

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

Bc. Adriana Pivodová

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského
inženýrství

Návrh optoelektronického systému pro měření a
vyhodnocení vzájemné polohy oka a mířidel

Design of Optoelectronic System for Measuring and
Evaluating the Relative Positions of the Eye and
Sights

2018

Bc. Adriana Pivodová

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Adriana Pivodová

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3901T009 Biomedicínské inženýrství

Téma:

Návrh optoelektronického systému pro měření a vyhodnocení vzájemné polohy oka a mířidel

Design of Optoelectronic System for Measuring and Evaluating the Relative Positions of the Eye and Sights

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s anatomíí lidského oka.
2. Seznámení se s problematikou sportovní střelby, zejména pak s mechanickými a optickými mířidly.
3. Seznámení se s problematikou biometrické identifikace.
4. Seznámení se s problematikou optického měření polohy ve trojrozměrném prostoru.
5. Návrh systému pro 3D sledování polohy a pohybu oka oproti mířidlům.
6. Realizace funkčního modelu zařízení pro měření polohy a pohybu oka v 3D s měřením natočení duhovky a měření průměru zornice.
7. Statistické vyhodnocení vlastností realizovaného zařízení z experimentálně získaných dat.
8. Zhodnocení dosažených výsledků práce.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] SNELL, Richard S. a Michael A. LEMP. *Clinical anatomy of the eye*. 2nd ed. Malden, MA, USA: Blackwell Science, 1998, viii, 423 p. ISBN 978-0632043446.
- [2] FENNING, Christopher. *Smallbore rifle shooting: a practical guide*. 2nd ed. Ramsbury: Crowood, 2010, viii, 423 p. ISBN 978-1847972262.
- [3] BARTH, Katrin a Beate DREILICH. *Training shooting sports: rifle - pistol: a practical guide*. 2nd ed. Maidenhead: Meyer, 2011, viii, 423 p. ISBN 978-1841263052.
- [4] GONZALEZ, R.C., R.E. WOODS a S.L. EDDINS. *Digital Image processing using MATLAB: a practical guide*. 2nd ed. Natick: Gatesmark Publishing, 2009, xviii, 826 s. ISBN 978-0-9820854-0-0.
- [5] LUHMANN, T., S. ROBSON, S. KYLE a J. BOEHM. *Close-range photogrammetry and 3D imaging: a practical guide*. 2nd edition. Natick: Gatesmark Publishing, 2009, xviii, 684 pages. ISBN 978-3110302691.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

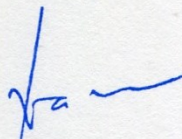
Vedoucí diplomové práce: **Ing. David Vala**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně. Veškeré použité podklady, ze kterých jsem čerpala informace, jsou uvedeny v seznamu použité literatury a citovány v textu dle příslušných norem.

V Ostravě dne 29. června 2018



.....

Adriana Pivodová

Poděkování

Touto cestou bych chtěla poděkovat vedoucímu této práce, Ing. Davidu Valovi, za odbornou pomoc, cenné rady, trpělivost a ochotu, se kterou se mi v průběhu zpracování diplomové práce věnoval.

V neposlední řadě bych ráda poděkovala své rodině a příteli za obrovskou podporu a trpělivost v době dokončování této práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na experimentálním měření a vyhodnocování vzájemné polohy oka a mířidel vzduchové pušky, respektive kamer. Problematika biometrické identifikace oka je hojně využívána v mnoha odvětví a v kombinaci s poznatky získanými v rámci této diplomové práce může být jmenovaná problematika dále rozvíjena.

Diplomová práce v teoretické části pojednává zejména o anatomii lidského oka a sportovní střelbě, neboť do této oblasti jsou výstupy práce směřovány.

V praktické části práce je popsán výběr kamer, jejich umístění a velmi důležitý proces kalibrování. Následně je popsán navržený algoritmus pro detekci očního okolí, středu zornice a detekce kružnic zornice a duhovky. Součástí této práce je i návržení a popsání algoritmu pro detekci natočení oka v oční jamce vztažené k optické ose mířidel, respektive páru kamer. Experimentálně získaná data jsou zaznamenána a zpracována ve formě grafických výstupů a v závěr práce jsou dosažené výsledky diskutovány.

Klíčová slova

Sportovní střelba, biometrická identifikace, biometrie oka, detekce duhovky, měření polohy ve 3D, trackování oka

Abstract

This diploma thesis deals with experimental measurement and evaluation of the mutual position of human eye and the air rifle sights, or more precisely, the video cameras. The issue of biometrical identification of an eye is commonly employed in various fields and combined with the results presented in this thesis, the issues can be further developed.

The theoretical part of the thesis introduces the basic concepts of the research, focusing primarily on the anatomy of human eye and describing shooting sport.

The practical part describes the selection of video cameras, their location and the very important process of calibration. It also presents the proposed algorithm for detecting the eye area, pupil centre and detection of the pupil and iris circle. Another part of the thesis is the proposal and description of the algorithm for detecting the rotation of an eye in the eye socket related to the optical axis of the sights, or, more precisely, the cameras. The experimentally collected data are recorded and processed in the form of graphical outputs and the results are then discussed at the very end of the thesis.

Key Words

Sports shooting, biometric identification, eye biometry, iris detection, 3D positioning, eye tracking

Obsah.....	viii
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	xi
Seznam obrázků.....	xii
Seznam tabulek.....	xii
Seznam grafů.....	xii
Úvod.....	1
1. Anatomie lidského oka.....	2
1.1 Oční koule	2
1.2 Rohovka	3
1.3 Bělima	3
1.4 Sklivec	3
1.5 Sítnice	3
1.5.1 Žlutá skvrna.....	4
1.5.2 Zrakový nerv	4
1.6 Čočka.....	4
1.7 Živnatka	5
1.7.1 Duhovka	5
1.7.2 Řasnaté těleso.....	5
1.7.3 Cévnatka.....	6
1.8 Přídavné části lidského oka.....	6
2. Problematika sportovní střelby.....	8
2.1 Základní techniky manipulace se zbraněmi	8
2.2 Základní prvky střelné zbraně	10
2.2.1 Vzduchová puška	11
2.3 Mířidla.....	11
3. Biometrická identifikace.....	12
3.1 Kritéria hodnocení biometrických technologií.....	13

3.2	Autentizační systém biometrických technologií	13
3.3	Základní biometrické metody.....	15
3.3.1	Biometrie tváře.....	15
3.3.2	Biometrie oční duhovky	18
3.3.3	Biometrie oční sítnice	20
4.	Eye tracking.....	23
4.1	Elektrookulografie.....	23
4.2	Fotookulografie a videookulografie	24
5.	Rekonstrukce 3D objektů za využití optických metod.....	25
5.1	Triangulační metody	25
5.1.1	Aktivní triangulace.....	25
5.1.2	Pasivní triangulace	26
5.1.2.1	Stereo-vidění.....	26
5.2	Kalibrace snímacího systému.....	27
6.	Návrh systému pro 3D sledování polohy a pohybu oka oproti mířidlům	29
6.1	Blokové schéma realizovaného systému.....	29
6.2	Softwarové vybavení pro realizaci modelu	30
6.3	Kalibrace kamer pro stereo-vidění	30
6.3.1	Kalibrační vzor.....	30
6.3.2	Snímání scény	31
6.3.3	Kalibrační toolbox.....	32
6.3.4	Návrh systému pro 3D sledování polohy oka	40
7.	Realizace funkčního modelu.....	44
7.1	Snímek.....	44
7.2	Detekce oka z obrazu	44
7.3	Funkce detekce oční duhovky	46
7.4	Funkce detekce natočení oční duhovky.....	47

8. Statistické vyhodnocení a zhodnocení experimentálních dat	50
8.1 Opakované měření vzdálenosti navrhnutým systémem	50
8.2 Detekce natočení oka v oční jamce	56
8.3 Sledování pozice oka.....	58
9. Závěr.....	61
Reference.....	62
Seznam příloh.....	65

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratky použité v této diplomové práci jsou uvedeny v seznamu a abecedně seřazeny.

2D	Dvoudimenzionální
3D	Trojdimenzionální
EOG	Elektrookulografie (electrooculography)
FPS	Snímek za sekundu (frames per second)
FULL HD	Vysoké rozlišení (high definition)
GUI	Grafické uživatelské rozhraní (Graphical User Interface)
HD	Hammingova vzdálenost (Hamming distance)
ISSF	Mezinárodní střelecká federace (International Shooting Sport Federation)
MAR	Minimální rozlišovací úhel (minimum angle of resolution)
MAX	Maximum
MIN	Minimum
NIR	Blízké infračervené pole (near infrared radiation)
POG	Fotookulografie (Photooculography)
RGB	Barevný režim (red-green-blue)
ROI	Oblast zájmu (Region of Interest)
RPR	Retinální pigmentový epitel
USB	Univerzální sériová sběrnice (Universal serial bus)

Seznam ilustrací

Obrázek 1: Anatomická struktura lidského oka	2
Obrázek 2: Pohledové směry	7
Obrázek 3: Základní střelecký postoj pro střelbu vstoje	9
Obrázek 4: Vzduchová puška: Popis základních prvků dlouhé zbraně.....	10
Obrázek 5: Biometrie lidské tváře.....	16
Obrázek 6: Vývojový diagram identifikace na základě oční duhovky	18
Obrázek 9: Snímek lidského oka pořízeného monochromatickou CCD kamerou.....	19
Obrázek 10: Oční pozadí sítnice pravého oka.....	21
Obrázek 7: Elektrookulografie: umístění elektrod.	23
Obrázek 8: Sakadické pohyby při čtení textu	24
Obrázek 9: Triangulační trojúhelník.	25
Obrázek 10: Princip stereovidění.....	27
Obrázek 11: Radiálně symetrická distorze.....	28
Obrázek 12: Radiálně symetrická distorze.....	28
Obrázek 13: Blokové schéma realizovaného systému	29
Obrázek 14: Kalibrační vzor pro kalibraci kamer	30
Obrázek 15: Nastavení parametrů snímaného obrazu.....	31
Obrázek 16: Hlavní menu kalibračního toolboxu	33
Obrázek 17: Kalibrační obrazy	34
Obrázek 18: Extrakce rohů kalibračního paternu.....	34
Obrázek 19: Příklad chybného označení vnějších rohů při extrakci	35
Obrázek 20: Výstup extrakce rohů kalibračního vzoru.....	36
Obrázek 21: Vizualizace vnějších parametrů kamery vůči kalibračním vzorům.....	37
Obrázek 22: Hlavní menu stereo-kalibrace.....	37
Obrázek 24: Detekce bodů kalibračního vzoru aplikací Stereo Camera Calibrator: Nevhodně detekovaný počátek souřadného systému vpravo dole	39
Obrázek 25: Vizualizace stereo páru kamer aplikací Stereo Camera Calibrator	40
Obrázek 26: Nosná konstrukce stereo-páru kamer	41
Obrázek 27: Měřicí pole pro určování 3D souřadnic bodu.....	41
Obrázek 28: Výsledek rektifikace snímků zachycených pravou a levou kamerou.....	42
Obrázek 29: Výstupy úspěšné detekce očí.....	46
Obrázek 30: Výstupy neúspěšné detekce očí.....	46
Obrázek 31: Detekce duhovky pomocí Houghovy kruhové transformace	47
Obrázek 32: Detekce natočení oční bulvy v oční jamce.	48
Obrázek 33: Výsledná detekce natočení oka v oční jamce	56
Přílohy	
Obrázek A2.1: Zobrazení optickou soustavou	69
Obrázek A2.2: Základní parametry optické soustavy	70

Seznam tabulek

Tabulka 1: Význam symbolů použitých v kódovacím procesu duhovky.	20
Tabulka 2 : Vnitřní parametry kamery získané kalibrací.....	36
Tabulka 3: Opakované měření bodu ve vzdálenosti 10 cm, 15 cm a 20 cm od kamery	50
Tabulka 4: Výběrové statistické charakteristiky	51
Tabulka 5: Opakované měření bodu ve vzdálenosti 31 cm, 33,5 cm, 36 cm, 38,5 cm a 41 cm od kamery.....	54
Tabulka 6: Výběrové statistické charakteristiky pro měřené vzdálenosti	54
Tabulka 7: Chyby měření.....	55
Tabulka 8: testování detekce natočení oka v oční jamce	57
Tabulka 9: Měření průměrného času detekce středu zornice a její kružnice	60

Seznam grafů

Graf 1: Opakované měření vzdáleností 10 cm, 15 cm a 20 cm	51
Graf 2: Opakované měření vzdálenosti 10 cm.....	52
Graf 3: Opakované měření vzdálenosti 15 cm včetně odlehlého pozorování	52
Graf 4: Opakované měření vzdálenosti 15 cm bez odlehlého pozorování.....	53
Graf 5: Opakované měření vzdálenosti 20 cm.....	53
Graf 6: Srovnání opakovaných měření ve vzdálenostech 31 cm, 33,5 cm, 36 cm, 38,5 cm a 41 cm ..	54
Graf 7: Záznam jednotlivých pozic středu zornice pravého oka.....	58
Graf 8: Záznam jednotlivých pozic středu zornice pravého oka.....	58
Graf 9: Záznam jednotlivých pozic středu zornice pravého oka.....	58
Graf 10: Záznam jednotlivých pozic středu zornice pravého oka.....	59
Graf 11: Záznam jednotlivých pozic středu zornice pravého oka.....	59
Graf 12: Záznam jednotlivých pozic středu zornice pravého oka.....	59

Úvod

Biometrickou identifikaci lze obecně považovat za soubor technik a metodik zaměřujících se na rozpoznávání nejrozličnějších biologických charakteristik. Biometrie založená na snímání oční duhovky je spolu s otisky a testování DNA nejspolehlivějšími metodami pro identifikaci a autentizaci jedince.

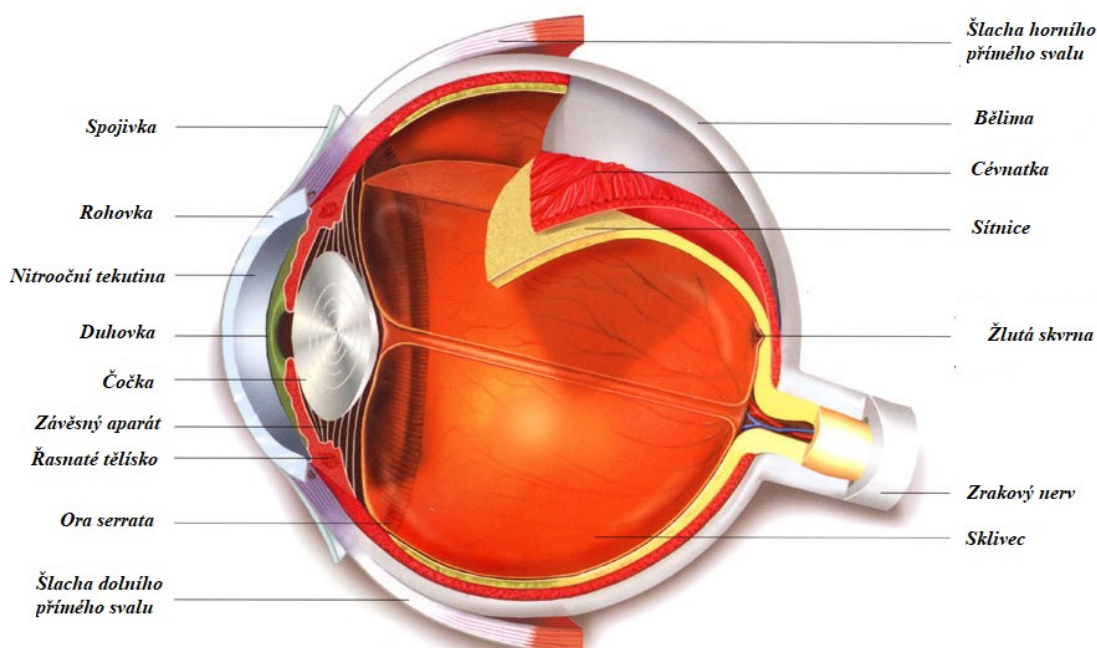
Diplomová práce je strukturálně dělena na dvě hlavní části, a to teoretickou a praktickou část. V teoretické části práce jsem se zabývala anatomii lidského oka, kde jsem popsala jednotlivé biologické struktury oka. Následující kapitola již pojednává o problematice sportovní střelby, kde jsou popsány techniky a pravidla pro bezpečnou manipulaci se střelnou zbraní. Popis jednotlivých prvků a částí zbraně je věnována samostatná kapitola. V kapitole s názvem Biometrická identifikace jsem popsala základní principy biometrických technologií a vybrané metody založené na biometrii tváře, duhovky a sítnice. Předposlední kapitola stručně popisuje vybrané techniky používané pro sledování a vyhodnocování pohybu oka ve zdravotnictví. V závěru teoretické části je popsána problematika rekonstrukce objektů v trojrozměrném prostředí, přičemž touto kapitolou navazuji na praktickou část diplomové práce.

Praktická část je rozdělena do tří hlavních bloků, v nichž je popsán vytvořený optoelektrický systém, navržena metodika měření a experimentálně získaná data jsou vyhodnocena a v závěru práce diskutována.

Tato experimentální práce je zasazena do prostředí sportovní střelby částečně využívající biometrii oční duhovky. Na základě detekce očního okolí, duhovky a zornice je možné stanovit střed zornice a měřit její průměr, který je závislý na míře vnějšího osvětlení. Pomocí navrženého algoritmu pro měření polohy bodu ve trojrozměrném systému je možné stanovit vzdálenost oka od mířidel, respektive od kamer. Kamerami zachycená scéna očního okolí umožňuje na základě použitého algoritmu stanovit polohu středu zornice ve 3D prostoru a natočení oční koule v oční jamce. Experimentálně získaná data slouží jako zpětná vazba trenéru, který je schopen na základě těchto výsledků hodnotit schopnost zlepšování se střelce.

1. Anatomie lidského oka

Zrak patří mezi nejdůležitější smyslová ústrojí, neboť zrakovými vjemy vnímáme a zpracováváme největší množství informací. Zrakem lze vnímat jas, barvitost, tvar i prostor. Lidské oko je párový orgán a je tvořeno dutinou, zvanou očníci (*orbita*), jež je zanořeno do obličejové části lebky. Očnice je tvořena kostí čelní, kostí jářmovou, horní čelistí, kostí slzní, kostí čichovou, kostí klínovou a kostí patrovou. Kostěná dutina je propojena s ostatními dutinami štěrbinami či kostními kanály. Součástí očnice je oční koule, stěny oční koule, zraková nerv a přídatné orgány. Oční koule v předozadním směru je tvořena rohovkou, bělímou, očním mokem neboli komorovou vodou, duhovkou, oční čočkou, sklívcem, očním nervem, žlutou a slepou skvrnou, sítnicí a cévnatkou. Zároveň oční kouli prochází pomyslná optická osa oka. Anatomickou strukturu lidského oka lze pozorovat na *Obrázku 1*.



Obrázek 1: Anatomická struktura lidského oka: Příčný řez, pohled shora. Upraveno podle <http://www.optika-safarikova.cz/oko.html>

1.1 Oční koule

Oční koule, jinými slovy oční bulva (*bulbus oculi*), vyplňuje podstatnou část očnice. Oční koule je kulovitého, mírně asymetrického tvaru o průměru cca 23 mm v příčném směru a 25 mm v předozadním směru. Oční bulbus je tvořen stěnou, jež je strukturálně rozdělena do tří vrstev. Vnější vazivová vrstva (*tunica fibrosa*) představuje povrch bulbu, následuje vrstva cévnatá (*uvea*) a poslední vrstvou je vrstva nervová (*tunica interna*). Vazivová vrstva je tvořena kolagenními vlákny a představuje tak tuhý obal oka. Svou tuhostí umožňuje oční kouli zachovat si svůj tvar, mimo jiné je možné v této části oka najít úpony okohybných svalů. Vnější vazivová stěna je součástí optického systému oka, neboť její přední část umožňuje vstup světelným paprskům do oka. (1)

1.2 Rohovka

V přední části vazivové vrstvy se nachází rohovka (*cornea*), jenž funkčně odděluje vnější a vnitřní prostředí oka a zároveň zastává funkci refrakčního prostředí. Rohovka je charakteristická oblast, která je bezcévná, průhledná a zakřivená. Rohovka je z vnější části tvořena pětivrstevným dláždicovým epitelem, zatímco vnitřní část rohovky je pokryta jednovrstevným dláždicovým epitelem. (2)

Ochranou funkci rohovky zajišťuje slzný film. Rohovka je tvořena třemi vrstvami rozdílného složení, na základě kterého je do jisté míry chráněna vůči mechanickému či imunologickému poškození. Průměr rohovky dosahuje tloušťky 11,5 mm ve vertikálním směru, 12,6 mm v horizontálním směru a disponuje optickou mohutností 43 D. (3)

1.3 Bělina

Bělina, jinými slovy také skléra, tvoří z velké části tuhý obal oka přispívající k jeho mechanické ochraně, udržení tvaru a tonu oční koule a mimo jiné jsou v této části oka upnuty vnější okohybné svaly. Bělina je charakteristická svou bílou barvou, přičemž transparentní barvy dosahuje v případě disfunkcí souvisejících se schopnostmi vázat vodu. Z histologického hlediska je bělina tvořena kolagenními vlákny různého směru, které jsou v oblasti výstupu zrakového nervu uspořádány zásadně cirkulárně. Přední část bělimy přechází v rohovku, hranice přechodu těchto dvou prostřední se nazývá limbus. Zadní částí bělimy odstupuje zrakový nerv. (3)

1.4 Sklivce

Sklivcem nazýváme průhlednou rosolovitou hmotu vyplňující z 80 % oční bulbus, jejíž funkce je pojivová a zároveň je nedílnou součástí zobrazovacího očního systému, neboť jím prochází světelné paprsky dopadající na sítnici. Z hlediska struktury je sklivce tvořen tekutinou obsahující fyziologicky významné molekuly, síťovinou kolagenních vláček a buněčnými složkami. (3)

1.5 Sítnice

Sítnice je považována za nejdůležitější součást lidského oka a zobrazovacího systému vůbec, neboť disponuje světločivými buňkami, jež jsou způsobilé za převod obrazu na elektrické vzruchy. Sítnice je tenká vnitřní vrstva nacházející se v zadní části oční koule, jejíž tloušťka dosahuje 0,5 mm-0,1 mm v závislosti na anatomické oblasti sítnice. Z fyziologického hlediska rozlišujeme na sítnici několik vrstev, avšak nejvýznamnější je vnitřní vrstva neuroretinu a vnější vrstva retinálního pigmentového epitelu (RPE). Součástí sítnice oka jsou tzv. vertikální neurony, které jsou tvořeny vrstvami receptorů, bipolárních a gangliových buněk. Světelné paprsky, které dopadají na sítnici oka, procházejí postupně gangliovými buňkami, vnitřními segmenty sítnice a následně dopadají na fotoreceptory. Stimuly z fotoreceptorů jsou převáděny na elektrochemický signál, který je postupně šířen pomocí prodloužených axonů buněk receptorů, jež jsou navázány

na axony bipolárních buněk, které jsou spojeny s gangliovými buňkami. Shluky axonů gangliových buněk tvoří množství nervových vláken, které ústí ve zrakový nerv.

Fotoreceptory sítnice jsou dvojího druhu: tyčinky a čípky. Tyčinky, jejichž množství je cca 140 milionů, umožňují vnímání rozdílu světla a s rostoucím věkem se jejich množství snižuje. Denzita a distribuce tyčinek se liší v závislosti na topografii sítnice, centrální část sítnice, tedy umbo, neobsahuje žádné tyčinky. Nejvyšší denzita tyčinek je v oblasti fovey. Pro tyčinky je typické skotopické vidění, které je charakteristické schopností vnímat světelné podněty i za velmi slabého osvětlení, avšak neumožňuje vnímat barvy. Za citlivost na světlo je zodpovědný pigment rodopsin, který umožňuje absorpci fotonů. Molekula rodopsinu je složena ze dvou částí, jejichž jedna část absorbuje aldehyd vitamínu A, druhou částí je protein opsin. Naopak čípky, jejichž počet je ve srovnání s tyčinkami pouhých 5 milionů, využívají svých funkcí za jasného světla a jejich počet je neměnný s ohledem na stárnutí. Čípky umožňují vnímat barvy a ostrost, zajišťují tedy fotopické vidění. Schopnost čípků vnímat barevnost je umožněna třemi druhy čípků (S, M, L), jež jsou citlivé na červené, zelené a modré světlo. Citlivost čípků na určitou vlnovou délku je ovlivněna proteinem opsinem. Nejvyšší denzita čípků je v oblasti umba, naopak téměř žádné se nevyskytují v periferních oblastech sítnice. (4)

Synapse fotoreceptorů je uskutečňována pomocí receptorového terminálu, u čípků je to pedicle a u tyčinek se jedná o spherule. Fotoreceptory jsou diferencovány podle segmentu na vnější, v němž dochází k přeměně světelného podnětu na elektrický signál a vnitřní, kde probíhají oxidační reakce umožňující vytvářet synaptická spojení s bipolárními buňkami. Vnější segment fotoreceptorů je dle cirkadiálního rytmu obnovován a zároveň fagocytován. Fagocytóza tyčinkových částí vnějšího segmentu probíhá ve dne, naopak v noci jsou fagocytovány čípky. Axony fotoreceptorů jsou obklopeny interfotoreceptorovým matrix zajišťující výživu, výměnu metabolitů mezi cévním zásobením a transport retinolu mezi epitelem a fotoreceptory. (3)

1.5.1 Žlutá skvrna

Žlutá skvrna se nachází v oblasti sítnice, která je zbarvena do žlutozelené barvy a leží v optické ose oka. V tomto místě je oko schopné vidět obraz nejostřeji. Žlutá skvrna je napojena na bipolární a gangliové buňky vytvářející současně jamkovité vhloubení, které usnadňuje fotonům dopadat přímo na fotoreceptory. Mimo žluté skvrny se na sítnici vyskytuje místo, jenž neobsahuje žádné fotoreceptory. Oblast bez fotoreceptorů, kde nemůže být vnímán obraz, se nazývá slepá skvrna. (4)

1.5.2 Zrakový nerv

Zrakový nerv vzniká shlukem nervových vláček gangliových buněk, které ústí stěnou oční koule. (4)

1.6 Čočka

Čočka je bezbarvá struktura bez inervace a s konvexním tvarem na obou plochách, jejímiž zásadními funkcemi jsou schopnost akomodace, refrakce a udržení své průhlednosti pomocí určitého množství energie. Čočka je upevněna závěsným aparátem k řasnatému tělísku a zároveň je umístěna mezi duhovkou a sklivcem. V závislosti na věku se mění velikost, tvar i optické

vlastnosti čočky např. index lomu. Index lomu je optická veličina srovnávající rychlost šíření světla ve vakuu oproti rychlosti šíření světla v jiném materiálu. Index lomu je rozdílný v závislosti na topografii čočky z důvodu její strukturální heterogenity. Mohutnost čočky je 15-20 D. (3)

Nejpodstatnější funkcí lidské čočky je zprostředkování průchodu světelných paprsků a vytvoření tak obrazu na sítnici. Nezbytným dějem v procesu zobrazování je schopnost akomodace. Akomodace umožňuje vyklenout přední plochu čočky, a tím měnit dioptrickou sílu oka. Během akomodace dochází ke kontrakci očních svalů, jejichž důsledkem dochází k povolení napětí závěsného aparátu a vyklenutí čočky, čímž se zvýší dioptrická síla. Po ukončení akomodace jsou všechny struktury vráceny do původního tvaru a stavu. Kontrakce očních svalů uložených v odlišných směrech způsobují smrštění očních svalových vláken, které způsobí napnutí vláken upínajících řasnaté tělísko. Tento akomodační proces způsobí vertikální prodloužení čočky. Pro zprostředkování průchodu světelných paprsků je kromě akomodačních procesů nezbytná transparentnost čočky. Transparentní prostředí je zajištěno metabolickými procesy a vnitřními regulačními mechanismy uvnitř čočky. Transparentnost čočky je také zajištěna obsahem specifických proteinů, krystalinů, jenž v souvislosti s určitým uspořádáním buněk, umožňují dosáhnout rozdílných hodnot indexů lomu čočky a anatomických struktur ji obklopujících. (3)

1.7 Živnatka

Živnatka, jinými slovy uvea, je biologická struktura s širokým cévním zásobením, jejíž hlavními funkcemi je zásobování krví, produkce a hospodaření s komorovou vodou či kontraktilnost očních svalů pro schopnost akomodace. Živnatku tvoří oční duhovka, řasnaté těleso a cévnatka.

1.7.1 Duhovka

Duhovka neboli iris, se nachází v přední části oka a z anatomického hlediska je rozdělena na část ohraničující zornici a část přecházející v řasnaté těleso. Duhovka je kruhovitěho tvaru s otvorem (zornicí) uprostřed, kterým prochází světelné paprsky dopadající na sítnici. Podpůrná vazivová tkáň duhovky obsahuje pigmentové buňky, tedy chromatofory, jejichž hlavním úkolem je zabránění průniku světelných paprsků mimo zornici. Množství chromatofor ovlivňuje výsledné zbarvení duhovky. Množství procházejících paprsků řídí duhovkové svaly, z nichž jeden sval svírá duhovku a druhý ji rozvírá. Duhovka je tvořena cévní a nervovou pletení a zároveň vykazuje funkce svěrače a rozvěrače zornice regulující její šíři. Svěrač resp. rozvěrač zornice reaguje na míru osvětlení a v závislosti na něm dochází ke kontrakci svalu. (3), (4)

1.7.2 Řasnaté těleso

Řasnaté těleso je významnou částí závěsného aparátu, neboť je v něm usazena čočka. Řasnaté těleso charakterizují řasy, jejichž sekrecí je umožněno plnění zadní komory oka nitrooční tekutinou. Povaha svalů upínajících se k tělesu odpovídá schopnosti akomodace čočky, jejíž výsledkem je změna tvaru, a tedy i optické mohutnosti čočky. Pro pozorování na blízkou vzdálenost je nutné, aby závěsný aparát byl povolen a došlo tak k vyklenutí čočky a její akomodaci. (3)

1.7.3 Cévnatka

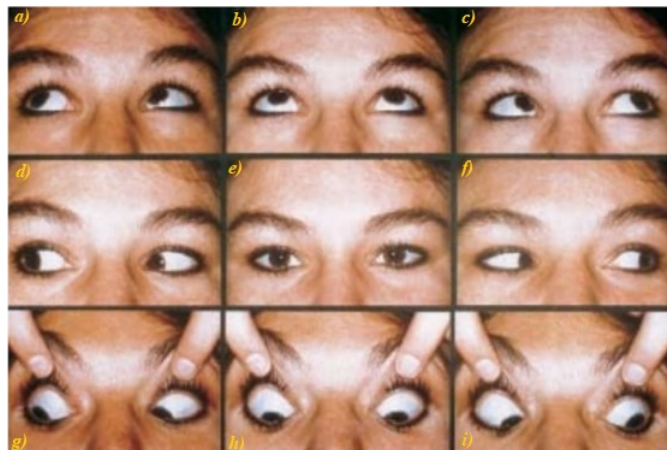
Cévnatka se nachází v zadní části očního bulbu a izoluje od sebe prostředí sítnice a bělimy. Strukturálně je tvořena cévními a kapilárními sítěmi a dále buňkami zajišťující výživu epitelu sítnice a fotoreceptorů.

1.8 Přídavné části lidského oka

Přídavnými částmi lidského oka myslíme zejména oční víčka, slznou žlázu, ale i měkkou očníci. Oční víčka jsou významnou bariérou chránící vnitřní prostředí oka před mechanickými a imunologickými poškozeními. Víčko je tvořeno kožní řasou, která je větší u horního očního víčka a menší u dolního očního víčka. Tvar víčka se horizontálně zužuje a přechází do závěsného vaziva, které slouží k udržení tvaru víček. Funkce ochranná je zajištěná pravidelným pohybem víček- mrkáním, které umožňuje zachovat v oku vlhkost. Stlačení očních víček k sobě vyvolá tlak na slzné kanálky, jež vytlačí slznou tekutinu do nosu, která je následně po uvolnění očních víček podtlakem nasána do odvodných slzných cest. Disfunkce víček, konkrétně nízká frekvence mrkání, je naopak příčinou permanentního slzení.

Slzná žláza je důležitou součástí očního aparátu, neboť chrání oční kouli jejím zvlhčováním. Žláza zajišťuje zvlhčení oka v reakci na různé podněty, které mohou být dráždivé nebo také emoční. Základní sekreci však zajišťují žlázy spojivek.

Mezi přídavné orgány lze řadit dále i obočí a okohybné svaly. Obočí představuje pravidelně uspořádané chlupy nacházející se v horním okraji očníce, jejichž funkce je ochranná. Okohybné svaly jsou oproti obočí nedílnou součástí očního aparátu, bez kterého by nebylo možné zajistit pohyblivost oka. Pohyby oka lze dělit na monokulární a binokulární. Monokulární pohyb představuje pohyb jednoho oka, tedy dukci, která může probíhat po horizontále nebo vertikále. Horizontální dukce se dále dělí na abdukci, která hodnotí pohyb oka zevním směrem a na addukci, která umožňuje pohyb oka vnitřním směrem. Monokulární vertikální pohyb oka je označován jako deprese a elevace v závislosti na vykonaném směru. Mimo vertikálního či horizontálního pohybu oční bulva je schopna provádět také torzní pohyb, přičemž horní okraj oka směřuje k zevnímu či vnitřnímu koutku oka. Binokulární pohyby představují naopak koordinaci pohybů obou očí, přičemž tyto pohyby mohou být stejnosměrné nebo protisměrné. Schéma znázorňující veškeré možné pohledové směry je uvedeno na *Obrázku 2*.



Obrázek 2: Pohledové směry: a) vpravo nahoru b) nahoru c) vlevo nahoru d) vpravo e) zpřímá f) vlevo g) vpravo dolů h) dolů i) vlevo dolů. Převzato z (5)

Svaly oka a očního okolí zprostředkovávají pohyby oční bulvou tak, aby obraz dopadal do úseku žluté skvrny obou očí, a z tohoto důvodu musí být optické osy směrem dopředu sbíhavé.

Pohyb oka zajišťují příčně pruhované svaly, jejichž funkce umožňuje pohybovat oční koulí a zdvihat oční víčko nebo jsou při pohybu oka uplatňovány svaly hladké, které kromě jiných funkcí zajišťují udržení oční koule ve správné poloze. Okohybné příčně pruhované svalstvo je charakteristické kruhovitou šlachou, která je upínána k očnici. Okohybné svaly rozlišujeme přímé, konkrétně se jedná o svaly horní, dolní, vnitřní a zevní a dále svaly šikmé, mezi které jsou řazeny svaly dolní šikmý a horní šikmý. Přímé okohybné svaly zprostředkovávají pohyb do stran a směrem nahoru a dolů. Horizontální pohyb zajišťují svaly horní a dolní přímý sval, kdežto pohyb vertikální umožňují svaly dolní a horní přímý. Šikmé okohybné svaly při pohledu před sebe provádějí rotaci (vyklenutí) oční koule dovnitř respektive ven a zároveň sekundárně provádí stáčení oční bulvy směrem dolů a zevně, resp. směrem nahoru a zevně. Hladké svaly oka jsou inervovány sympatikem a jsou podstatné pro udržení oční bulvy v přední části očnice či usměrnění velikosti oční štěrbin. (1)

2. Problematika sportovní střelby

Sportovní střelba je řazena do sportovního střeleckého odvětví, kde některé disciplíny jsou začleněny v rámci olympijských her jako samostatná disciplína nebo v kombinaci s jinou sportovní technikou. V tomto případě mluvíme např. o biatlonu kombinující právě sportovní střelbu a běh na lyžích nebo moderní pětiboj zahrnující střelbu, šerm, jezdeckví, plavání a přespolní běh. Ať už se jedná o samostatnou střeleckou disciplínu nebo kombinovanou, cílem je co nejpřesnější zasažení statického nebo pohyblivého terče, jehož podoba se v závislosti na druhu disciplíny může lišit. Střelecké disciplíny jsou rozlišovány zejména podle použité střelecké zbraně, které jsou puškové, pistolové nebo brokové. (6) V následujícím textu budou rozebrány základní techniky, principy a manipulace s dlouhými zbraněmi, neboť ty jsou pro tuto práci zásadní.

2.1 Základní techniky manipulace se zbraněmi

Střelné zbraně určené pro sportovní účely sami o sobě nejsou nebezpečným nástrojem, pokud jsou používány v souladu s bezpečnostními pravidly, se kterými je nutné se předem seznámit. Důkladné proškolení o principech střelby a manipulaci se zbraní umožňuje zvýšení bezpečnosti pro sportovce či držitele palné zbraně a jeho okolí. Prvnímu výstřelu střelce ze zbraně kromě návyku bezpečnostních pravidel předchází i učení základním dovednostem střelby, kde je nutné perfektně ovládat:

- Střelecký postoj
- Držení a manipulaci se zbraní
- Míření v součinnosti s dechovou aktivitou
- Souhra spouštění

Zásadním bodem je střelecký postoj, jež zahrnuje postavení nohou, rukou, hlavy ale i celého trupu. Tělo střelce musí být pevné, avšak ne strnulé a váha těla musí být rovnoměrně rozprostřena do obou chodidel. Střelecký postoj není striktně standardizován, ale je řízen základními pravidly postavení nohou, napnutí rukou či polohy hlavy a může se tak mírně lišit v ohledu na tělesnou stavbu střelce. Střelecký postoj je rozdílný, pokud se jedná o střelbu vstoje nebo vleže, jednoruční či obouruční střelby nebo v závislosti na typu střelné zbraně. (7)

Základní střelecký postoj lze vidět na *Obrázku 3*, který demonstruje postoj střelce z polohy vstoje.



Obrázek 3: Základní střelecký postoj pro střelbu vstoje: Boční pohled, střelec opírá hlavu v místě lícni kosti o pažbu zbraně, pravé rameno i paže uvolněné, avšak pevně drží rukojeť pažby. Levé rameno je svěšeno a paže se dotýká trupu těla v oblasti hrudního koše. Pravá noha je vysunuta dozadu s mírným natočením špičky ven. Převzato z (8)

Držení zbraně, myšleno ve smyslu správného úchopu, je zásadní pro ideální míření bez nadbytečného namáhání očí a co nejpřesnějšího zasažení cíle. V problematice úchopu zbraně jsou definovány termíny tzv. silné a slabé ruky. U střelce, jehož dominantní ruka je pravá, bude nazývána jako silná ruka a levá ruka jako slabá. Dominantní ruka střelce zajišťuje pevný úchop zbraně a stisk spouště. Slabá ruka střelce umožňuje provádět veškeré další úkony jako je stabilizace zbraně, manipulace se zásobníky, nápravu závad apod. Silná ruka fixuje zbraň v části pistolové rukojeti, slabá ruka je umístěna na podpaždí zbraně. V závislosti na typu dlouhé zbraně může být úchop slabé ruky umístěn výrazně v přední části zbraně. Správný úchop zbraně je podmíněn taktéž polohou loktů, kdy zásadní problém vyvstává, pokud lokty jsou téměř ve vodorovné poloze či naopak křečovitě sevřené podél trupu. Zmíněné dva extrémy znemožňují manipulaci se zbraní a negativně ovlivňují pohyb střelce zejména ve stísněných prostorech. (9)

Pro přesnou střelbu je nutné synchronizovat dýchání s procesem míření. V průběhu zamíření je tak nutné přerušit dýchání, neboť dechová aktivita způsobuje pohyby těla, které by v případě výstřelu způsobily nepřesnost. Správná technika a zejména načasování nádechu a výdechu je výsledkem tréninku střelce. (7)

Podstatou přesného zásahu cíle je především zvládnutá technika míření, která si žádá trénink střelce. Nejprve je nutné stanovit si, tak jako dominantní ruku, i tzv. řídicí oko. Řídicí oko je to, kterým bychom hleděli do klíčové dírky a používáme ho pro sledování obrazu mířidel, druhé oko je zavřené. Míření jedním okem je základní metoda míření předcházející míření s oběma otevřenými očima, která je složitější. Při procesu míření je důležité okem zaostřit na obraz mířidel a v případě, že horní hrana mušky není v úrovni horní hrany hledí, je nutné nepatrnými pohyby zbraň srovnat. (10) Optická soustava každého člověka je jiná a zahrnuje nejrůznější typy očních vad a dalších defektů. Principem míření je vytvoření pomyslné osy počínající v oku střelce a dále

procházející přes mířidla do bodu, na který zaměřujeme. V závislosti na rozlišovacích schopnostech oka nelze dosáhnout zároveň ostrého vidění mušky, hledí a terče, a tak je v případě mířené střelby nutné udržet zrakovou ostrost především na obraze mířidel (terč bude tedy rozostřený). Rozhodující vlastností při mířené střelbě je také rychlost zamíření, neboť z fyziologického hlediska není možné udržet zrakovou ostrost akomodovaného oka nablízko příliš dlouho. Hraniční doba se pohybuje do 12 s, a pokud v tomto časovém úseku není uskutečněn výstřel, dochází ke ztrátě ostrého vidění a namáhání zrakového aparátu. (10) Rychlost zamíření na záměrný bod je ovlivňována mnoha vnějšími faktory působících na střelce, ale také důležitou roli sehrává velikost, vzdálenost nebo pohyb cíle.

Kritická fáze střelby nastává v momentě spouštění. Střelec pro spouštění používá ukazováček, který se bříškem prstu dotýká spouště už ve chvíli, kdy zaměřuje svůj cíl. Tlak prstu na spoušť musí být dostatečný a plynulý, aby nedocházelo k nežádoucímu cukání či vychýlkám. Vlivem těchto nežádoucích vychylek může docházet k nepřesnostem při zásahu cíle z důvodu ztráty srovnání mířidel. (7) Důležité je si uvědomit, že výstřelem manipulace se zbraní nekončí. Po výstřelu následuje zpětný ráz zbraně, který způsobí její dočasné vychýlení a po návratu zbraně do původní polohy střelec může sklonit zbraň k zemi.

2.2 Základní prvky střelné zbraně

Střelnou zbraň všeobecně tvoří její hlavní části podléhající z hlediska legislativy povinné evidenci, ovládací prvky a demontážní prvky. Hlavní části zbraně představují hlaveň, rám zbraně a závěr. Hlaveň lze popsat jako úsek zbraně, kterým prochází střela, která je vypálena z nábojové komory. Soudobé hlavně palných zbraní jsou z vnitřní strany opatřeny drážkami, které umožňují udělit nábojnici rotaci a také vytvářejí specifické mechanické vrypy, podle nichž lze provést identifikaci náboje se zbraní. Základní popis prvků dlouhé zbraně lze vidět na *Obrázku 4*.



Obrázek 4: Vzduchová puška: Popis základních prvků dlouhé zbraně. Upraveno podle (7)

Manipulaci se zbraní umožňují ovládací prvky jako je spoušť, klika závěru, pojistka a záchyty zásobníku. Demontážní prvky zbraně slouží k jejímu rozebrání za účelem čištění zbraně a následného složení.

2.2.1 Vzduchová puška

Disciplína střelby ze vzduchové pistole byla zařazena do programu mezinárodní střelecké federace (ISSF) teprve ve 2. polovině 20. století a získává neustále na oblíbenosti. (7) Vzduchová pistole, také nazývána jednoduše jako vzduchovka, je palná dlouhá zbraň, jejíž zdrojem energie je stlačený vzduch nebo oxid uhličitý. Pro střelbu jsou využívány kulové broky nebo olověné diabolky s plochým čelem, nejčastěji ráže 4,5 mm.

Vzduchové pušky členíme podle zdroje energie na pružinové¹ a zásobníkové. Pružinové vzduchové pušky využívají jednoduchý mechanismus vyvíjení tlaku vzduchu na píst, který dále uděluje hybnou sílu náboji. Energie potřebná k výstřelu vzniká v momentě, kdy je hlaveň zlomena a pružina je tak stlačena. Stiskem spouště dochází k uvolnění pružiny a nahromaděná energie pak vyvine tlak na píst. Píst následně žene vzduch směrem k náboji a udělí mu pohybovou energii. Předností tohoto typu pušky je její finanční nenáročnost a jednoduchá údržba, naopak nevýhody spočívají především v přesnosti střelby, neboť její zpětný ráz je mnohem větší než u jiných typů vzduchových pušek. Pro sportovní účely se používají vzduchové pušky se zákluzem hlavně eliminující zpětný ráz. Nutností u pružinových pušek je také před každým výstřelem zbraň natáhnout, tedy není možné použít pro kontinuální střelbu. Zásobníkové vzduchové pušky se od předchozího typu liší možností souvislé střelby, kterou zajišťují bombičky plněné oxidem uhličitým nebo stlačeným vzduchem v kartuši. Výhodou těchto pušek je výborná přesnost, neboť zpětný ráz zbraně je minimální. Nevýhodami jsou zejména finanční náročnost provozu oproti klasickým vzduchovým puškám a náchylnost na teplotní a tlakové výkyvy u CO₂ vzduchovek.

2.3 Mířidla

Mířidla jsou základní prvky zbraně, která umožňují míření na cíl. Jednoduše lze mířidla dělit na otevřená nebo krytá. Otevřenými mířidly je myšlena muška a hledí, krytá mířidla jsou tvořena muškou a krytým hledím. Kromě předchozího kritéria dělení lze mířidla rozlišovat podle způsobu použité technologie na mechanická a optická mířidla. V přední části hlavně u jejího ústí se nachází muška, naopak hledí je umístěno v zadní části mechanických mířidel. Zadní mířidla mohou být statická nebo také umožňují výškové a stranové nastavení. Výhodou využití mechanických mířidel je minimální citlivost na okolní osvětlení, naopak nevýhodou je neschopnost pozorovat hledí, mušku a terč, zároveň střelec ztrácí povědomí o dění kolem sebe.

Standardní mířidla lze doplnit např. kolimátorem, který spadá do kategorie mířidel optických. Kolimátor lze charakterizovat jako zařízení tvořené zrcátkem a světelným zdrojem. Světelný zdroj se v momentě míření pomocí zrcátka odráží do bodu, do kterého míříme. Předností optických mířidel je přesnost a schopnost zacílit i za snížených světelných podmínek.

¹ Pružinové vzduchové pušky jsou v některých literaturách uváděny jako pístové vzduchové pušky.

3. Biometrická identifikace

Biometrie či biometrická identifikace je definována jako proces zjišťování či ověřování identity člověka nejčastěji na základě jeho jedinečných fyzikálních či fyziologických znaků a v dnešní době lze kromě těchto markerů použít k identifikaci i behaviorální chování člověka. Obecně lze biometrii zařadit mezi vědní obory, jež se zabývají jakýmkoliv způsobem měřitelnými či hodnotitelnými charakteristikami za účelem jednoznačného určení jedince. Podstatné pro obor biometrie je tedy identifikace a verifikace živého organismu. Pojmem identifikace je myšleno ztotožnění osoby, které je následováno ověřením, tedy verifikací. Princip identifikace se opírá o tři tradiční modely, které postupně procházely vývojem. První model identifikace vychází z principu vlastnictví předmětů či přiřazených charakteristik, mezi které řadíme jména a příjmení, identifikační karty, čipy, čísla apod. Identifikace pomocí tohoto modelu je základní a jeví se se značnou nejednoznačností a tedy nízkou přesností, neboť konkrétně příjmení lze měnit uzavřením sňatku a nelze podle něj jednoznačně určit pohlaví jedince. Nevýhody spojené s vlastnictvím čipových karet a průkazů totožnosti je časté padělání, ztráty či odcizení. Druhý model identifikace je založen na principu znalostí. Znalostmi se rozumí povědomí o konkrétních heslech, frázích a vlastnostech, které by měly být známy pouze oprávněným osobě. Obecně se jedná o statická či dynamická hesla, nebo soukromé informace, které se týkají např. oblíbenosti jídel, barev apod. Nevýhodou tohoto principu identifikace je možnost zapomenutí hesel nebo odhadnutí frází týkajících se osobních otázek. Nejjednoznačnější a nejpresnější způsob identifikace je za využití biometrické charakteristiky. Předchozí modely identifikace lze navzájem kombinovat, a tím zvýšit jednoznačnost a přesnost identifikace. (11)

Identifikovat lze však téměř cokoli, ať už jsou to kromě lidí živočichové, předměty, jevy, procesy a obecně lze za identifikaci považovat i diagnostiku onemocnění. S identifikací a verifikací se setkáváme téměř neustále, ať už se jedná o osobní identifikaci pracovními čipy v zaměstnání, při zadávání hesel nebo pin kódu k bankovnímu účtu či při legitimaci občanským průkazem. Typy identifikace a verifikace popsané výše jsou z hlediska bezpečnosti snadno zneužitelné či padělatelné, a proto byl nástup biometrických metod zásadní. Biometrické metody zvyšují bezpečnost ověření identity na základě jedinečných znaků, jejichž zneužití je téměř nemožné nebo významně komplikované. Biometrické metody jsou využívány k zajištění bezpečnosti lidí, v kriminalistice a forenzních vědách, zabezpečení a ochrany např. ve finančnictví či odvětví obchodu, informatiky a telekomunikací. (12)

Biometrická identifikace se nejčastěji zaměřuje na zpracování a vyhodnocování fyziologických markerů otisků prstů, geometrie ruky, sítnice, duhovky, hlasu, DNA, postury a jiných. Zásadním aspektem fyziologických markerů je robustnost a rozlišovací způsobilost. Robustnost fyziologického znaku vypovídá o jeho schopnosti vývoje v průběhu času, tedy o jeho stabilitě. Pokud bychom srovnávali robustnost biometrie hlasu a duhovky, pak lze tvrdit, že robustnost markeru duhovky je větší než marker hlasu, neboť ten se v průběhu života mění. Rozlišovací schopnost konkrétního znaku musí být natolik jedinečná, aby se shodně neprojevovala v populaci, proto je mnohem příznivější využití otisků prstů oproti detekci geometrie ruky. Mezi znaky s adekvátní rozlišovací schopností a konzistentností v čase řadíme anatomické rysy ve tváři, kde zásadní roli hraje posazení lícních kostí či nadočnicových oblouků, nebo vzorování duhovky a její struktury cévního zásobení. Do jisté míry je možné mezi tento

atribut zařadit i rukopis či mluvu, jež řadíme mezi behaviorální znaky, které lze hodnotit napříč časem. (13)

3.1 Kritéria hodnocení biometrických technologií

Biometrické technologie v praxi jsou podmíněny několika atributy, na nichž závisí nejen efektivita, ale celkový přínos. Mezi tyto charakteristiky je řazena univerzálnost ověřovaného objektu, jedinečnost, stálost, možnost sběru dat a přijatelnost. Charakteristikou univerzálnosti je myšlena nutnost nalezení nějaké biometrické charakteristiky, na základě které jsme schopni provést identifikaci a verifikaci. Jedinečnost biometrické charakteristiky musí být dostatečně silná, aby nebylo možné v rámci populace najít dvě osoby se stejným znakem. Biometrická charakteristika by měla být zásadně neměnná v čase, aby bylo možné provádět identifikaci v dlouhodobém časovém horizontu. Zásadní vlastností biometrie je sběr dat a jejich uchovávání, a proto charakteristiky musí být zaznamenatelné pomocí dostupných snímacích zařízení a uchovatelné v kvalitě umožňující jejich zpracování. Tato základní kritéria jsou doplněna o mnoho dalších zejména z oblastí technických, finančních či algoritmických. Z finančního hlediska je zásadním atributem technologií zejména jejich pořizovací cena, cena spojená s provozem a obsluhou zařízení. Při hodnocení použité technologie z hlediska technického je zásadní doba zpracování informací, efektivnost, výkonnost, přesnost nebo rychlost. Kritéria algoritmická a bezpečnostní jsou důležité z pohledu využití vhodných matematických modelů, zabezpečení nasímaných dat, přenosových protokolů apod. (12)

3.2 Autentizační systém biometrických technologií

Obecný model autentizačního systému pro vyhodnocování biometrických charakteristik je tvořen senzory či jinými čtecími zařízeními schopnými detekovat konkrétních markery ze vstupních signálů a dále dvěmi podjednotkami, z nichž jedna je uzpůsobena pro registraci zachycených znaků a druhá zajišťuje funkci identifikace. Jednotka registrace biometrických měření (*angl. enrollment*) zachycujících relevantní informace ze surových dat, které jsou extrahovány a následně uloženy do databáze. Identifikace člověka je prováděna na základě získaného biometrického vzorku, ze kterého je extrahovaná požadovaná charakteristika. Následně je prováděna verifikace, kdy zkoumanému subjektu s biometrickým znakem je přiřazeno identifikační číslo, pod kterým je prováděno srovnávání vlastností vůči šabloně v databázi. Autentizační systém v konečné fázi rozhodne, zda se jedná o pozitivní či negativní identifikaci. Pro pochopení pochodů probíhajících v rámci systému biometrických technologií je zásadní objasnění jednotlivých pojmů, jež s touto problematikou souvisí. Podstatným prvkem je biometrický vzorek (*angl. biometric sample*), který představuje charakteristiku člověka z hlediska anatomického, fyziologického nebo behaviorálního. Biometrickým vzorkem je tedy otisk prstu, slina, fotografie oční duhovky či podpis. Z biometrického vzorku zpracováváme biometrické charakteristiky (*angl. biometric characteristics*), jsou to veškeré měřitelné údaje, které lze získat ze vzorku bez ohledu, zda jsou pro identifikaci relevantní. Naopak relevantní informace získaná z biometrického vzorku se nazývá biometrický identifikátor (*angl. biometric identifier*). Biometrickými identifikátory oční duhovky jsou rýhy, proužky a specifické body kolem zornice, které jsou vysoce unikátní. Soubor s naměřenými daty, jejichž součástí jsou hodnoty, biometrické

charakteristiky a jiné o určitém počtu minimálních záznamů se nazývá biometrická šablona (*angl. biometric template*). Šablona je nedílnou součástí databáze, neboť na jejím základě probíhají procesy identifikace a verifikace. (11)

Automatizované biometrické zpracování je tvořeno několika základními bloky, jejichž úkolem je snímat biometrické vzorky ve formě biometrických dat, přenos těchto dat, následné zpracování získaných informací, validace a uložení dat. Sběrem biometrických dat je myšleno snímání anatomických, fyziologických nebo behaviorálních charakteristik, které je prováděno kamerovým systémem, senzorem nebo např. mikrofonom a dále zpracováváno do biometrické šablony. Přenos dat je nutné zajistit v případě, že snímání biodat a jejich zpracování probíhá v odlišných blocích biometrického systému. Pro přenos dat je nutná jejich úprava komprimací z důvodu obrovské obsáhlosti a po přenosu jejich zpětná dekomprimace. Během těchto procesů však dochází ke kvalitativním ztrátám, které následně ovlivňují konečnou rozhodovací fázi. Dosažení adekvátních výsledků procesů identifikace a verifikace je podmíněno zpracováním biometrického signálu, tedy vzorku. Nejprve je nutné ze signálu extrahovat biometrické charakteristiky a z nich získat charakteristické identifikátory bez rušivých jevů a nadbytečných nevhodných informací. Extrakce je ireverzibilní proces, z něhož nelze získat zpět původní informaci, neboť extrakcí je získán mnohonásobně menší objem dat. Výsledným prvkem extrakce je šablona, která odráží množinu bodů o minimálním počtu, které definují unikátnost jedince z hlediska biometrických charakteristik. Po nasnímání biometrických dat popř. až během jejich zpracování je nutné provést kontrolu jejich kvality. V případě, že biometrický vzorek je chybně nasnímán nebo jeho kvalita neumožňuje adekvátní zpracování a vyhodnocení, je nutné biometrické snímání opakovat. Pakliže biometrické vzorky prošly s pozitivním výsledkem kontrolou kvality, vzorky jsou postoupeny do etapy porovnávací. Porovnávací proces probíhá mezi získanou šablonou vzorku a databází, ve které se nacházejí již dříve nasnímané šablony. Aby bylo možné provést porovnání šablon, je nutné provést prvotní uložení vzorové neboli referenční šablony do databáze. Příkladem referenční šablony může být sejmutý obraz duhovky zaměstnance umožňující přístup do budov zaměstnání. Identita dat je v databázi konkrétně přiřazena určitému jedinci. Při porovnání nově nasnímaného obrazu je podle výsledku rozhodovacího procesu jedinec oprávněn ke vstupu či nikoliv. (12)

Biometrická identifikace je primárně založena na posuzování podobnosti charakteristických identifikátorů oproti biometrické šabloně. Identifikaci lze také chápat jako ztotožnění jednoho vůči mnohým vzorovým šablonám, často vyjádřeno termínem 1:n, zaznamenaných v databázi. Biometrická identifikace využívá dva rozdílné módy, a to pozitivní a negativní identifikaci. Pozitivní identifikace představuje ztotožnění charakteristických znaků se šablonami v databázi. V procesu identifikace mohou vzniknout chyby jako je falešné přijetí (*angl. false accept*) a falešné odmítnutí (*angl. false reject*). V případě falešného přijetí je do systému vpuštěna neoprávněná osoba, falešné odmítnutí má naopak za následek nevpuštění do systému oprávněné osoby. Pozitivní identifikace pracuje na principu velmi podobném verifikaci. Obě tyto chyby musí systém umět správně eliminovat. Principiálně se negativní identifikace příliš od první případu neliší, avšak cílem této identifikace je prokázat, že osoba se v dané databázi nenachází. V případě, že charakteristické znaky snímané osoby se neshodují se žádnou šablonou, je osobě zpřístupněn vstup. Shoda znaků s některou ze šablon znamená odmítnutí přístupu. I v tomto módu identifikace se mohou objevit chyby jako je falešně negativní výsledek a falešně pozitivní výsledek. Po úspěšné identifikaci celý proces postupuje k verifikaci, tedy porovnání

označovaného také termínem jedna k jedné (1:1) a je následně potvrzena či vyvrácena identita. Verifikace jedna k jedné je proces o mnoho rychlejší než identifikace, neboť je porovnáván charakteristický znak s již konkrétní jednou šablonou. Verifikace stejně jako identifikace pracuje s biometrickou databází, kde se nacházejí šablony přidružené konkrétnímu subjektu. Proces verifikace může rozhodnutí procesu identifikace potvrdit či vyvrátit. (11)

Princip registrace referenčních šablon do databáze se liší dle toho, zda se jedná o verifikaci a identifikaci pozitivní nebo o identifikaci negativní. V prvním případě jsou v databázi shromážděny biometrické znaky subjektů disponujících oprávněním a na základě těchto šablon probíhá verifikace a pozitivní identifikace. Každému subjektu je přiřazeno identifikační číslo či pořadí obsahující konkrétní biometrickou šablonu. Databáze pro negativní identifikaci je naopak tvořena šablonami subjektů, u kterých je nežádoucí přijetí.

3.3 Základní biometrické metody

Anatomicko-fyziologické a behaviorální odlišnosti člověka umožňují využití v autentizačních systémech pro identifikaci a verifikaci, jejichž efektivnost a spolehlivost závisí na konkrétní biometrické metodě. Základní biometrické metody se nejčastěji zabývají těmito identifikacemi:

- DNA
- Otisku prstů
- Tváře
- Oční duhovky
- Oční sítnice
- Geometrie ruky a dlaně
- Hlasu
- Podpisu

Kromě výše uvedeného přehledu základních metod používaných v běžné praxi se můžeme setkat s biometrickými metodami identifikace např. držení těla, způsobu chůze, otisků ucha nebo dynamiky úhozů do klávesnice. Z hlediska využití jsou některé metody méně či více vhodné pro konkrétní aplikace. Problematice biometrických metod identifikace tváře, oční duhovky a sítnice jsou věnovány samostatné kapitoly.

3.3.1 Biometrie tváře

Biometrická metoda identifikace tváře je považována za nejběžněji využívanou metodu umožňující pracovat se statickým i dynamickým obrazem někdy i v podmínkách přeplněného pozadí. V rámci identifikace tváře biometrickou metodou rozlišujeme zpracování dvojrozměrných a trojrozměrných obrazů, barevných, černobílých nebo infračervených obrazů. Identifikaci člověka na základě jeho tváře využíváme každý den po celý svůj život, kdy jsme schopni konkrétní osobu zařadit do okruhu rodiny, přátel, spolupracovníků, pokud však náš mozek vyhodnotí, že osobu neznáme, stejně tak je tato informace uložena do paměti jako zrakový vjem, který může v pozdějším případě identifikován. Hlavními úkoly detekce je rozpoznání obličeje v obraze, tedy vyhledání tváře, pokud existuje a jeho identifikace. Analýzou tváře lze detekovat nejružnější geometrické body obličeje či jeho hranice, které jsou časově neměnné. Metoda se zaměřuje na hlavní charakteristické obličejové atributy, jimiž jsou body vnějších a

vnitřních koutků oka, vnější body rtů, bod přechodu nosu v čelo, bod špičky nosu, body na chrupavce ucha a body ušního lalůčku. (12) Identitu člověka lze stanovit pomocí spojnic mezi jednotlivými body, které tak vytvářejí unikátní obrazec (Obrázek 5)



Obrázek 5: Biometrie lidské tváře: Vlevo základní obličejové atributy, vpravo obličejové atributy propojeny v charakteristický obrazec. Převzato z (12)

Pro zvýšení efektivity analýzy tváře je nejčastěji využíváno pevného a jednoduchého pozadí s řízeným osvětlením. Největší komplikací je přizpůsobení obrazu, který byl zachycen z rozdílného pohledového úhlu a za odlišných světelných podmínek. (14) Při zachycení obrazu pod různými úhly snímání je nutné zohlednit změnu délek spojnic a jejich úhlů. Úhel snímání definován soustavou souřadnic, kdy osa X představuje boční rovinu, osa Y vertikální rovinu a osa Z horizontální rovinu. Přepočet délek spojnic se provádí pomocí poměrových změn a vyjádřením koeficientů získaných nasnímáním tváře z různých pohledových úhlů. Je důležité vědět, že některé délky spojnic a velikosti úhlů nelze získat, tato situace nastává v případě, že tvář je snímána z bočního pohledu, kdy nelze pozorovat vzdálenější polovinu tváře nebo určité body zakrývá nos. Kromě výše popsané analyticko-statistické metody lze identifikovat osoby podle grafické metody. Grafická metoda vychází z deskriptivní geometrie, která předpokládá, že tvář je popsána soustavou identifikačně významných bodů, a pakliže mezi dvěma stejnými obrazy rozdílné velikosti existuje perspektivní projekce, tak jsou identifikované jako shodné.

S rozvojem výpočetní techniky se rozvíjely i metody identifikace tváře, kdy analytické a grafické metody byly téměř nahrazeny těmi plně automatizovanými. Identifikace tváře probíhá nejprve zachycením celkového obrazu, a dále detekcí a lokalizací tváře. Usnadnění identifikace je umožněno zejména pozadím a jeho světelných podmínkách. Složitější je detekovat tvář v pozadí, kde se nachází více osob, světelné podmínky jsou proměnné apod. Z tohoto důvodu se pro identifikaci využívá pevného pozadí s definovanými světelnými vlastnostmi. Tvář je ve scéně detekována na základě existence charakteristických obličejových bodů, které se nacházejí ve stejném podprostoru scény. Po úspěšné detekci tváře je obraz normalizován, kdy dochází k úpravě velikosti měřítka obrazu, nastavení bodů definujících prostorovou orientaci tváře, stupňů šedi a tak i jasu obrazu. Výhodou normalizovaného obrazu je schopnost identifikovat osobu navzdory dioptrickým brýlím, změnám barvy vlasů nebo emočním výrazům. Standardizovaný formát obrazu lze vzájemně porovnávat a používat k identifikaci a verifikaci. Nejběžněji využívanými metodami pro detekci tváře ve scéně obrazu jsou:

- Metoda distribuce odstínů šedé barvy
- Metoda určování geometrických tvarů
- Metoda deformačních modelů
- Metoda neuronových sítí

Velmi využívaná metoda detekce tváře je založena na principech distribuce odstínů šedi v obraze využívající ke svému zpracování mozaiku. Metoda mozaiky využívá čtvercovou síť rozměrů 3x3 nebo 4x4, kterou je ke zkoumání podrobena jak vstupní scéna, tak data uložená v databázi pro úspěšnou verifikaci. Pakliže v jednotlivých blocích nacházíme obličejové markanty, jako jsou nos, oči, ústa, jejichž distribuce šedé barvy je odlišná od okolí, pak je využita detailnější mozaiková síť 8x8. Na tuto síť jsou pro konečné ověření a určení obličejových markantů aplikovány metody detekce hran. Po úspěšné detekci obličeje v obraze nastává verifikace a to porovnáním segmentů, tedy čtverců obsahující obličejové markanty. Nevýhodou této mozaikové detekce obličeje ve scéně je její zdoluhavý proces, neboť je nutné provést porovnání segmentů každý s každým, a proto bývá často využívána v kombinaci s jinou metodou.

Rozpoznávat lidské tváře lze i na základě jejich obličejových kontur. Detekci kontur lze definovat v obraze zejména oči, ústa či nos, které lze detekovat zejména prahováním², detekcí hran a dalšími metodami. Detekce tváře na základě určování geometrických tvarů se zaměřuje na obličejové objekty jako v předchozích metodách. Každý objekt je definována deformační šablona a jeho energetická funkce vyjadřující maxima a minima odstínů šedi. Minima odstínů šedi jsou vyjádřeny obličejové kontury. Nalezením všech minim a maxim dosáhneme nalezení samotných objektů. Nevýhodou této metody je nutnost filtrace odlesků vznikajících v oku nebo její nízká rychlost při vyhledávání energetických minim. Výpočetní rychlost je kompenzována při použití deformačních modelů. Metoda deformačních modelů je vystavěna na principu sítě tvořenou vodorovnými a svislými čarami. Síť čar pomyslně přiložena na obličejovou část hlavy vytváří plastický model charakterizovaný pomocí hustoty čar. Z hustoty čar lze vyčíst výšková minima a maxima, jejichž zakřivení definuje povrch tváře. Plastický model tváře je využíván pro identifikaci a verifikaci osob zohledňující fázi mluvení nebo emoční stav.

Neuronovými sítěmi uzavíráme stručný přehled nejvýznamnějších metod detekce a identifikace lidské tváře. Neuronové síť pro rozpoznávání tváří lze použít ve dvou modelech, a to ve smyslu detekce charakteristických obličejových znaků nebo v nalezení těchto znaků a konečné verifikace. V závislosti na typu modelu je použita jednoduchá nebo složitější neuronová síť. Neuronové síť jsou kromě detekce a identifikace tváře velmi vhodné např. pro analýzu písma, hlasu, otisků prstů nebo dlaní. Výhoda využití metod neuronových sítí mimo jiné také spočívá ve schopnosti detekce tváří za snížených světelných podmínek a jsou schopné identifikovat osobu s brýlemi či rozdílným účesem.

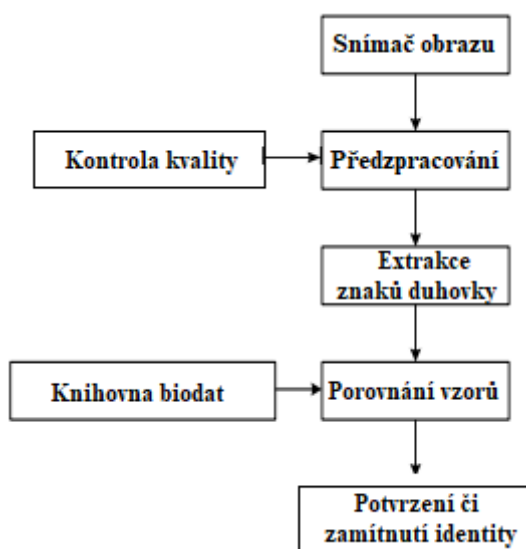
Výhodami identifikačních metod tváře je jejich bezkontaktní snímání, které lze provést i na větší vzdálenost, kdy sledovaná osoba si není ničeho vědoma. Skrytá identifikace v případě

² Prahování je jednou z metod segmentace obrazu hodnotící jas pixelů. Cílem prahování je nalezení bodu (prahu), kdy nižší hodnoty jasu pixelů oproti prahu budou odpovídat pozadí ve scéně. Hodnoty jasu pixelů, které budou vyšší oproti prahu, jsou definovány jeho popředí scény.

zneužití umožňuje vniknutí do soukromí osoby a porušení jejích osobních práv. Biometrická autentizace na základě tváře je využívána v souvislosti s biometrickými prvky dokladů, evidencí docházky v zaměstnání, bezpečnostních systémů regulující vstup do aplikace nebo objektu a mnoha dalších aplikacích. (12)

3.3.2 Biometrie oční duhovky

Identifikační metody orientující se na oční duhovku jsou považovány hned za otisky prstů za nejzákladnější a neznámější metody. Oční duhovka je charakteristické mezikruží, které umožňuje identifikaci na základě své originální kresby. Kresba duhovky je utvářena unikátními vzory radiálně uspořádaných trámčů s mnohačetnými záhyby. V užší části kolem zornice jsou jemnější, naopak v periferiích hrubší. (15) Informace získané z oční duhovky umožňují velmi efektivně provést identifikaci a verifikaci osoby, neboť nelze nalézt žádné dvě osoby se stejnými duhovkami, včetně dvojčat a dokonce nejsou identické duhovky náležící jedné osobě. Nespornými klady této identifikace je množství informací, které lze z duhovky získat, časová stabilita parametrů duhovky a nemožnost zneužití a to ani v případě chirurgické úpravy. Identifikace oční duhovky lze zjednodušeně popsat několika kroky, které lze vidět na *Obrázku 6*, jež spočívají ve snímání obrazu, jeho předzpracování během, kterého probíhá detekce oční duhovky a kontrola kvality snímku a v případě jejího potvrzení následuje extrakce charakteristických markantů, přizpůsobení obrazu, identifikace a verifikace. (16)



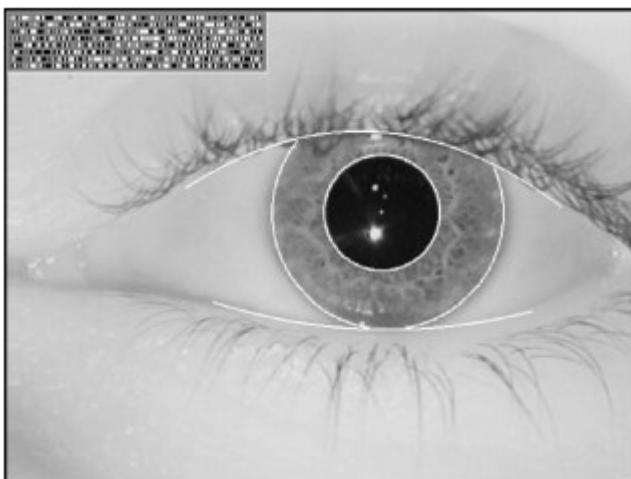
Obrázek 6: Vývojový diagram identifikace na základě oční duhovky, upraveno podle (16)

Identifikace a především verifikace je umožněna až po navedení šablon biometrických profilů do databáze. Charakteristickým znakem duhovky je již zmiňovaná trabekulární síť, která je definována až 266 stupni volnosti, které představují počet variací.

Proces nasnímání obrazu duhovky je podmíněn aktivní účastí snímané osoby, jejíž oko by se mělo nacházet ve vzdálenosti cca 9-30 cm od kamery, v opačných případech dochází k pořízení nekvalitního snímku a snímání musí být opakováno. Zásadní je během snímání vyloučit efekt osvětlení duhovky, které by také znehodnotilo snímek. Blokem kontroly kvality jsou také z dalších procesů vyřazeny obrazy duhovky, jež obsahuje méně než polovinu viditelné

kresby zapříčiněnou mrknutím. Z důvodu zaznamenání detailního obrazu duhovky včetně jejího vzoru, musí mít obraz duhovky velikost v rozsahu mezi 80-130 pixely. Ve většině případů se používají CCD monochromatické kamery, neboť využívají blízkého červeného pole NIR o vlnových délkách 700-900 nm. Snímky musí splňovat kritérium minimální ostrosti, kdy zaostřování je prováděno v reálném čase. Zaostřit obraz je umožněno na základě měření spektrálního výkonu ve středním nebo vyšším frekvenčním pásmu 2D Fourierova spektra s cílem nalézt maximum této funkce. Jakmile je snímek dostatečně ostrý, přistupujeme k samotné detekci duhovky ve snímku. (17)

Ze získaného snímku je důležité detekovat vnější a vnitřní hranice duhovky. Detekce hranic se provádí prahováním na základě distribuce šedi, kdy pupilární část je tmavší než vnější hranice duhovky. Hrany lze nalézt také aplikací tzv. zero-crossing³ na každý pixel, pro následné porovnání hodnot. Následným propojením okrajových segmentů získáme hranice. Použití průchodu derivace nulou je velmi zatíženo šumem, a proto je nutné zavést mediánový filtr. Výpočet souřadnic středu pupily se provádí počítáním pixelů v řádcích. Součtem x-ové souřadnice (resp. y-ové) prvního a posledního pixelu v řadě a podělením dvěma získáme množství bodů, z nichž středu pupily odpovídá nejčastěji překřížený bod. (18) Z fyziologického hlediska duhovka i zornice může vykazovat určité deformace, které je nutné zohlednit při určování hranic, a tak je na tyto hranice aplikován aktivní obrys kopírující skutečné hranice.



Obrázek 9: Snímek lidského oka pořízeného monochromatickou CCD kamerou: Bílými obrysy jsou vyznačeny detekované hranice zornice, duhovky a očních víček, Rámeček vlevo nahoře představuje kódující sekvence fázových kvadrantů duhovky. Převzato z (17)

Úspěšné předzpracování snímku umožňuje extrahovat unikátní atributy ze vzoru duhovky, které jsou následně specificky zakódované. Extrakci znaků duhovky a jejich následné kódování za účelem získání fázové informace umožňuje Gaborova vlnková transformace. Vzor duhovky je za sebou fázově kvantován za využití identifikace kvadrantu komplexní roviny pro každý výsledný fázor. Celý proces probíhá podle následující rovnice:

$$h_{\{\Re, \Im\}} = \text{sgn}_{\{\Re, \Im\}} \int_{\rho} \int_{\phi} I(\rho, \phi) e^{-i\omega(\theta_0 - \phi)} \cdot e^{\frac{-(r_0 - \rho)^2}{\alpha^2}} e^{\frac{-(\theta_0 - \phi)^2}{\beta^2}} \rho d\rho d\phi, \quad (3.1)$$

³ Průchod druhé derivace nulou

kde popis jednotlivých symbolů je pro přehlednost uveden v *Tabulce 1*

Tabulka 1: Význam symbolů použitých v kódovacím procesu duhovky. Upraveno podle (12)

Symbol	Význam symbolu
$h_{\{\Re, \Im\}}$	Komplexně ohodnocený bit
$I(\rho, \phi)$	Originál snímku vyjádřen v polárních souřadnicích
α, β	Vícerozměrné 2D parametry velikosti waveletu na duhovce
ω	Waveletová frekvence
r_0, θ_0	Polární souřadnice všech regionů duhovky

Komplexně ohodnocený bit, jehož reálná a imaginární část nabývá hodnot 0 nebo 1, je závislá na znaménkové funkci (sgn^4) 2D integrálu. Původní snímek duhovky je popsán výrazem $I(\rho, \phi)$, který je vyjádřen v polárních souřadnicích, a jehož parametry velikosti jsou konstantní. Symboly α a β vyjadřují velikosti waveletu na duhovce, jejichž rozměr se může pohybovat od 0,15–1,2 mm. Waveletová frekvence je pak definována jako symbol ω nepřímo úměrné k β . Polární souřadnice každého regionu duhovky jsou vyjádřeny jako r_0, θ_0 . Pro zpracování informací z duhovky je používána pouze fázová složka, neboť amplitudová složka je zatížena vnějšími faktory, jakou je typ použité kamery, osvětlení scény či kontrast obrazu. (12)

Získané vektory je nutné převést do podoby binárního kódu, ve kterém je mnohem snazší najít rozdíly dvou různých duhovek. V konečné fázi srovnávacího prostředí je využívána tzv. Hammingova vzdálenost, která je aplikována na binární kód znaků duhovky a umožňuje tak srovnání s binárními kódy duhovek zanesených v databázi. Hammingova vzdálenost, dále jen HD, je charakterizována jako nejmenší možná vzdálenost charakteristických znaků duhovky náležící jedné osobě. Nejvyšší hodnota HD patřící stále jediné osobě byla stanovena na maximálně 0,32. To znamená, že pokud je hodnota HD menší nebo rovna hodnotě 0,32, jedná se o duhovku stejné osoby, pakliže hodnota HD přesahuje tuto hraniční hodnotu, nejedná o stejnou osobu. (16)

Fyziologický stav duhovky je téměř neměnný, a proto její analýzu lze provádět, až do konce života pomineme-li devastující zranění očí apod. Zároveň výhoda spočívá v neovlivnitelnosti procesu identifikace a verifikace kontaktními čočkami nebo brýlemi.

3.3.3 Biometrie oční sítnice

Biometrie struktury sítnice oka je známá již od 40. let minulého století, avšak její využití v praxi bylo umožněno až o několik let později z důvodu obrovské nákladnosti a pokročilejších technologických aspektů. Cévní pletě sítnice je natolik originální a neměnná v průběhu života

⁴ Signum je definováno jako matematická funkce přiřazující reálné nebo imaginární proměnné orientovaný směr, a to od obrazu 0 k obrazu tohoto čísla.

viz *Obrázek 10*, že je možné ji využívat v rámci identifikačních procesů. V současnosti se biometrie sítnice pro identifikaci osob využívá, ale v daleko menší míře než je tomu u biometrie duhovky. Problémem je stále finanční stránka problematiky a složitost celého identifikačního procesu. (19)

Prvotní snímač sítnice byl vyroben společností EyeDentify v 80. letech minulého století a měl sloužit jako tzv. fundus kamera používaná oftalmology. Tento snímač se ve svém původním provedení neudržel na trhu z důvodu své velmi vysoké ceny, špatné ovladatelnosti a využití viditelného světla, které je nevhodné pro skenování. V pozdějších letech bylo využito infračervené světlo, které je vstřebáno cévní pletení sítnice mnohem rychleji, než je tomu u ostatních částí očního ústrojí. Speciální kamera využívající infračervené světlo, jehož rozsah vlnových délek je 760 nm-1 mm, vytváří téměř průhlednou sítnici a umožňuje tak získat obraz sítě cév. V pravém slova smyslu se tedy pro identifikaci osob nepoužívá obraz sítnice, ale obraz cévní sítě nacházející se až za ní. (20)



Obrázek 10: Oční pozadí sítnice pravého oka: Charakteristická cévní pletěň se slepou skvrnou představující světlou skvrnu v pravé části očního fundu. Převzato z (21)

Zdroj světla osvětluje sítnici oka soustředěným svazkem paprsků, kdy část odraženého světla od sítnice postupuje k čočce. Světelný paprsek vychází z očního prostředí úhlově nezměněn a je zachycován kamerou. Snímání očního pozadí se provádí ze vzdálenosti cca 2 cm a trvá přibližně 15 sekund. Během této doby skenovaná osoba musí setrvat hlavou v nehybné pozici s široce otevřeným okem, pro získání centrovaného snímku na kruhové jamce je nutné zaostřit na naznačený cíl. Pro kompenzaci případných zrakových vad skenovaných osob při zaostřování je tento cíl v ohniskové vzdálenosti +3, 0, -3 a -7 dioptrie, a tak k zaostření dochází bez ohledu na tyto vady.

Z nasnímaného obrazu sítnice je z hlediska zpracování zásadní pouze oblast mezikruží, která je normalizována ve formě kontrastů. Nejvyšší hodnota kontrastu představuje nejjasnější úsek obrazu, naopak nejnižší hodnota kontrastu představuje nejtmaší úsek kruhu. (12) Záznam sítnice oka může být dvojího typu, přičemž první typ obsahoval informace o kontrastech kódovaných reálnými a imaginárními souřadnicemi o celkové velikosti 40 bajtů. Pro získ

souřadnic z frekvenční oblasti byla použita rychlá Fourierova transformace. Novější způsob reprezentace sítnice využíval 48 bajtů, přičemž informace o kontrastech je zasazena do časové oblasti, jejíž zpracování je rychlejší. Referenční záznam sítnice je vytvořen z několika snímků sítnice, které jsou samostatně nasnímány. Pokud jsou korelační data shledána jako dostatečně kvalitní, je vytvořena šablona sítnice a uložena do databáze. Každé přiblížení oka ke snímací kameře je rozdílné oproti minulé pozici a z toho důvodu byl implementován rotační algoritmus umožňující posun dat o několik úhlových stupňů. Úhlových posunů je provedeno několik a na základě největší podobnosti je vybrán snímek, který je porovnán s referenční šablonou.

Každá biometrická technologie má svoje klady i zápory. Výhody snímání oční sítnice spočívají v její časové stálosti, během níž nedochází k téměř žádným strukturálním změnám. Výhodou je také rychlost zpracování charakteristických znaků snímků sítnice, které jsou oproti biometrickým znakům duhovky mnohem menší. Největším pozitivem této metody je získání bohatých a unikátních biometrických znaků ze sítnice, které nelze téměř vůbec zneužít. Kromě pozitiv se samozřejmě v rámci biometrie sítnice objevují i negativa. Zásadními problémy komplikující identifikační proces jsou oční choroby jako glaukom anebo katarakta, které se mohou objevit. Druhou slabinou této metody je nutnost vědomé spolupráce skenované osoby se zařízením, což v problematice kriminalistiky nemusí být příliš efektivní.

4. Eye tracking

Problematika sledování pohybů očí (*Eye tracking*) a její zkoumání je datováno již od 20. století, kdy probíhaly jedny z prvních pokusů měřit a vyhodnocovat oční pohyby. Metody detekce pohybů očí lze dělit podle použitého principu měření, a to na invazivní a neinvazivní. První z metod pro sledování pohybů oka se využívala metoda elektrookulografie EOG, následovaly metody invazivního eye-trackingu s využitím kontaktních čoček a dále foto a videookulografie (POG, VOG). Invazivní metody využívaly specificky upravených čoček, které byly aplikovány přímo do oka. Do kontaktní čočky byla implementována cívka a její orientace v elektromagnetickém poli určovala pozici a tedy i pohyb oka. Přestože se jedná o nejpresnější metodu, vlivem své invazivity se přistoupilo k neinvazivnímu sledování pohybu očí. Pro neinvazivní sledování pohybů očí se nejčastěji využívá elektrookulografie (EOG) a videookulografie (VOG). Třetí generace eye trackingu využívala analogový video záznam v kombinaci s detekcí dvou Purkyňových obrazů, které vznikají na vnitřních plochách zornice a duhovky po odražení světelného paprsku. (22) V dnešní době se pro sledování očního pohybu využívá digitálně zpracované video v kombinaci s Purkyňovými obrazy. Vlivem digitálně zpracovaného signálu je proces přínosnější vzhledem ke své rychlosti a přesnosti.

Eye tracking je uplatňován v mnoha různorodých oborech přes lékařství, automobilový průmysl nebo v odvětví marketingu apod.

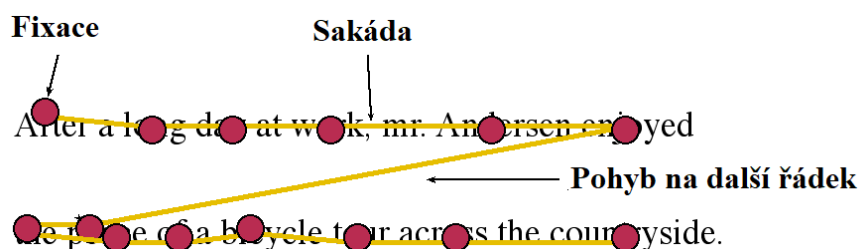
4.1 Elektrookulografie

Elektrookulografie se zabývá zkoumáním vertikálních a horizontálních pohybů očí na základě zaznamenávání změn elektrického potenciálu v blízkosti očí. Elektrookulografie se nejčastěji využívá v lékařství při diagnostice očních poruch a výzkumech zabývajících se spánkovými poruchami. Pro měření jsou využívány elektrody upevněné na spáncích nebo častěji nad a pod okem viz *Obrázek 7*, které zaznamenávají změnu potenciálu. Samotný elektrický potenciál je generován epitelem sítnice a závisí zejména na míře okolního osvětlení. (1) Principem vyšetření je sledování obrazového vzoru se specifickými znaky, kdy první etapa vyšetření je prováděna ve tmě za postupného zmenšování amplitudy. Ve druhé části vyšetření je použito plné osvětlení a amplituda je zvyšována. Výsledný poměr amplitud obou etap definuje Ardenův index, na základě kterého lze hodnotit retinální funkce.



Obrázek 7: Elektrookulografie: umístění elektrod. Převzato z (23)

Elektrookulografií není možné zaznamenávat mikropohyby oka, ale umožňuje zachytit pomalé sledovací pohyby oka a sakády, tedy rychlé pohyby oka. Pomalé sledovací pohyby zajišťují koncentrované pozorování jediného objektu, naopak sakadické pohyby jsou způsobitelné za obecné informace získané ze scény. Tento pohyb je charakterizován přesouváním se mezi body (Obrázek 8), které jsou v zorném poli nejzajímavější a dochází v nich k fixaci. Zároveň platí, že čím je doba fixace delší, tím je rychlost přesunu k dalšímu bodu rychlejší. (24)



Obrázek 8: Sakadické pohyby při čtení textu: Červené body označují fixační body, žluté linie vyjadřují jednotlivé sakadické pohyby. Upraveno podle (25)

4.2 Fotookulografie a videookulografie

Fotookulografie (POG) a videookulografie (VOG) je soubor metod, které hodnotí pohyby očí na základě pořízených fotografií nebo kontinuálně z videa. Bezkontaktní metody jsou neinvazivní a pracují na principech odrazu světelných paprsků a jejich následného snímání pomocí senzoru. V případě videookulografie je využíváno jedné nebo dvou kamer upevněných ve speciální masce, která je usazena na hlavě vyšetřovaného. Kamery zaznamenávají světelné odrazy, které jsou dále počítačově zpracovány a vyhodnoceny. (26) Kromě zachycování paprsků infračerveného světla lze hodnotit Purkyňovy obrazy vznikající na světlo lomivých plochách v oku. Videookulografií lze kvantitativně hodnotit polohu oka, zároveň se jedná o relativně levný diagnostický nástroj pro oční dysfunkce. Nevýhodou tohoto snímání očních pohybů je složitost diferenciací pohybů očí od pohybů celé hlavy.

5. Rekonstrukce 3D objektů za využití optických metod

Pro rekonstrukci 3D objektů nebo celých scén je využíváno počítačového vidění, které umožňuje na základě optických metod zachovat třetí rozměr objektu. Právě souřadnice z , tedy vzdálenost nebo hloubka objektu, je potlačena použitím běžných měřicích nebo zobrazovacích zařízení. Cílem rekonstrukčních metod je získání třetí souřadnice z 2D obrazu a vytvoření plasticity scény či objektu. Optické metody jsou všeobecně nejrozšířenější, neboť jejich výhodami jsou zejména přesnost a rychlost. Technologie optických metod umožňuje bezkontaktní a neinvazivní měření. Optické metody využívané pro měření se opírají o 3 hlavní principy:

- Triangulace,
- Optická interferometrie,
- Hodnocení doby letu modulovaného světla.

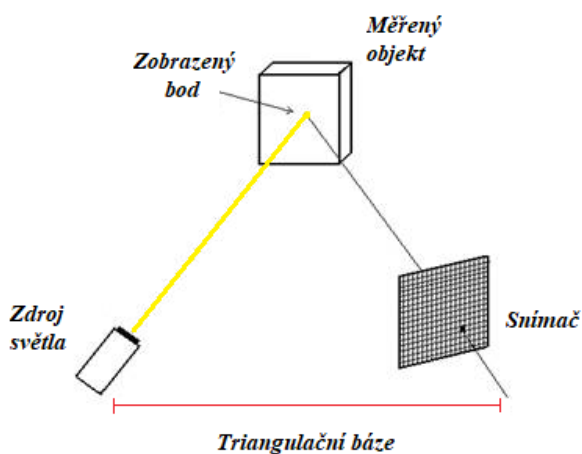
5.1 Triangulační metody

Triangulační metody jsou považovány za nejpřesnější a jsou tak nejužívanějšími optickými technikami pro rekonstrukci a měření 3D objektů. Triangulační techniky lze dále dělit do 5 podkategorií vzájemně se odlišujících principem použití. Triangulační techniky dělíme na:

- Aktivní triangulaci
- Pasivní triangulaci
- Systémy využívající teodolit
- Fokusovací techniky
- Techniky využívající podobu stínování

5.1.1 Aktivní triangulace

Aktivní triangulace vychází z fotogrammetrické technologie rekonstrukce objektu na základě osvětlení jeho povrchu a následného snímání senzorem. Aktivní triangulací vytváříme charakteristický triangulační trojúhelník (Obrázek 9), jehož body jsou tvořeny zdrojem světla, bodem vytvořeným paprskem na objektu a snímacím zařízením.



Obrázek 9: Triangulační trojúhelník. Převzato a upraveno (27)

Vzdálenost mezi body zdroje světla a snímače -tedy kamery, je označována jako triangulační báze. Úhel tvořený mezi zdrojem světla a triangulační bází je konstantní, naopak úhel svírající pomyslná spojnice snímače a triangulační báze je proměnný. Proměnlivost tohoto úhlu je dána aktuální pozicí bodu osvětleného zdrojem světla na objekt a zachyceného snímačem. Ze znalosti tohoto úhlu, triangulační báze a vnitřních parametrů snímací kamery lze odvozením a výpočty získat „z-ovou“ souřadnici objektu.

Aktivní triangulaci rozlišujeme podle druhu osvětlovacího vzoru. Jednorozměrná aktivní triangulace využívá jednoduchý světelný paprsek, jehož zdrojem je nejčastěji laser. Dvojrůzoměrná triangulace pracuje se světelným pruhem, strukturovaný světelný paprsek využívá trojrozměrná triangulace.

Přesnost měření aktivní triangulací je dáno velikostí triangulační báze, rozlišením kamery (tedy počtem světlocitlivých prvků kamery v pixelech) a ohniskovou vzdáleností kamery f . Čím větší budou hodnoty těchto parametrů, tím přesnější bude měření. Naopak čím větší bude velikost čipu snímacího zařízení (velikost světlocitlivých prvků kamery) a měřená vzdálenost objektu, tím nepřesnějších výsledků se dobereme. Výpočty jednotlivých parametrů jsou poměrně náročné, a proto jsou v praxi využívány vztahy určené kalibrací snímacího systému.

5.1.2 Pasivní triangulace

Pasivní triangulace je řazena mezi pasivní metody rekonstrukce 3D objektů nebo scény, které odvozují informaci o tvaru, jeho plasticitě (resp. hloubce) objektu za použití dvou a více kamerových zařízení. Pakliže je jeden konkrétní bod identifikovatelný z obrazů obou kamer, pak je možné dopočítat umístění tohoto bodu v prostoru. Pasivní triangulace využívající dvě kamerová zařízení, je také známá pod názvem stereo-fotogrammetrie. Pasivní triangulace umožňuje snímat scénu:

- Kamerami, jejichž orientace je předem známá
- Kamerami s auto-kalibrací
- Kamerou z různých poloh s auto-kalibrací

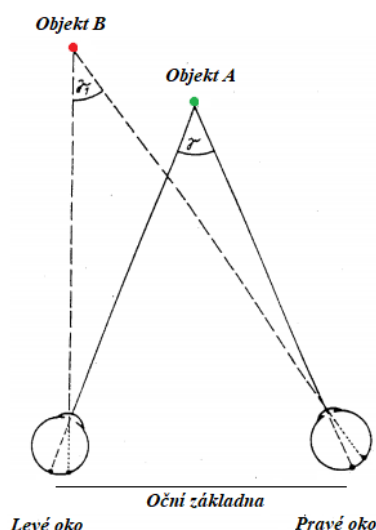
Kamerový systém tvořený dvěma kamerami zachycující stejný objekt resp. scénu ze dvou různých poloh jsou uplatňovány pro dynamické scény. Pro výpočet prostorového umístění bodu objektu jsou využity znalosti relativních poloh kamer nebo častěji kalibrační metody. Kalibrací jsou zjišťovány vnitřní a vnější parametry obou kamer, jejichž znalost je důležitá v triangulačním procesu.

Rozdílem mezi aktivní a pasivní triangulací je v prvním případě využívaný světelný zdroj oproti pasivní metodě. (28)

5.1.2.1 Stereo-vidění

Lidský zrak disponuje schopností prostorového vidění, díky němuž je lidské oko vnímat plasticitu okolního světa. Lidský mozek je schopen skládat dva obrazy téhož objektu, které jsou promítnuty na sítnici oka tak, že vnímáme jeden obraz objektu v prostoru. Účelem stereo metod a technik je simulace tohoto stereovidění v technické praxi.

Vzájemná vzdálenost očí je neměnná a představuje tak konstantní oční základnu. Pakliže pozorujeme 2 body v prostoru, jejichž umístění je odlišné, obrazy bodů jsou promítány na středy obou sítnic. (Obrázek 10)



Obrázek 10: Princip stereovidění. Převzato a upraveno podle: (29)

Lidský zrak umožňuje pozorovat objekty na základě protínání pomyslných očních os, které s pozorovaným objektem svírají určitý paralaktický úhel. Bod objektu A je promítán přesně do středu sítnice levého i pravého oka. Obraz bodu objektu B, který je umístěn vzdáleněji oproti bodu objektu A, je promítán blíže ke středu sítnice pravého oka než je tomu u levého. Vzniklé průměty obrazů bodů A a B, označíme-li je x_1 u levého oka a x_2 u pravého oka, umožňují vypočítat fyziologickou paralaxu p v horizontálním směru:

$$p = x_1 - x_2$$

Vertikální paralaxa q se při stereovidění neuplatňuje, neboť toto vidění narušuje nebo mu zcela zamezuje a vzniká, jestliže obrazy dvou bodů objektů neleží na stejných rovnoběžkách.

5.2 Kalibrace snímacího systému

Pojmem kalibrace kamerového systému rozumíme prvotní zjišťování vnějších ale především vnitřních parametrů kamer a jejich následné korekce. Zobrazovací kamera je definována jako dírková kamera s projekcí perspektivy. Projekční matice P této kamery je definována ve tvaru:

$$P = K[R|t], kde K = \begin{bmatrix} c_x & h_s & h_x \\ 0 & c_y & h_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

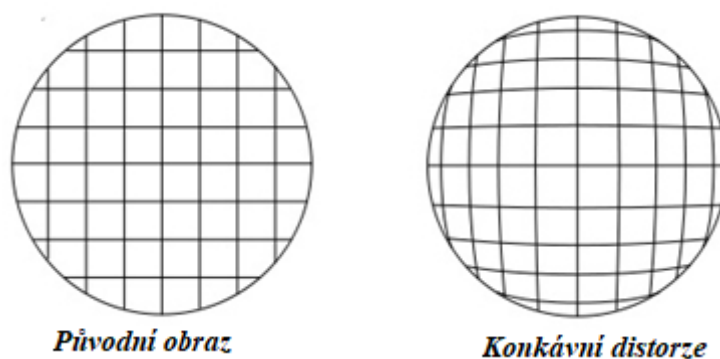
K představuje matici vnitřních parametrů: c_x a c_y jsou horizontální a vertikální ohniskové vzdálenosti v pixelech. Proměnná $h = [h_x, h_y]$ definuje hlavní obrazový bod, proměnná R označuje rotaci kamery a t polohu projekce středu zasaženého v souřadném systému. (30)

Vnější parametry kamer popisují jejich vzájemné umístění, které jsou kalibrací vypočítány a musí zůstat konstantní. Vnitřní parametry kamer definují jejich vlastnosti a

zkreslení. Zkreslení, tedy deformace obrazu, je dáno optickou čočkou zařízení. Nejběžnější deformace obrazu je radiálně symetrická a lze je rozdělit do dvou typů:

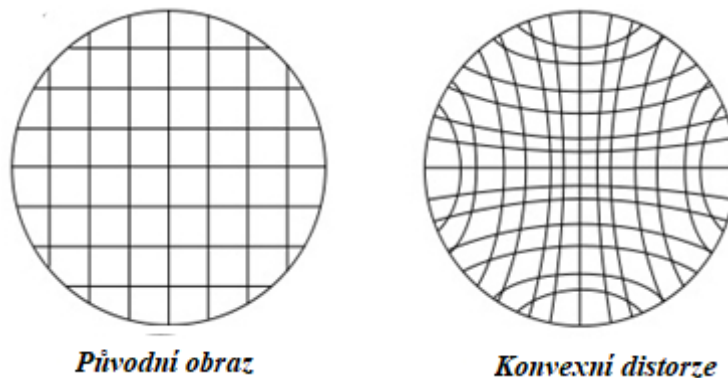
- Konkávní zkreslení - soudková distorze
- Konvexní zkreslení - jehelníčková distorze.

Soudková distorze představuje zkreslení, které se zvětšuje se zvětšující se vzdáleností od optické osy. Konkávní zkreslení deformuje obraz tak, že vypadá jako by byl promítán na kouli nebo elipsoidu (*Obrázek 11*)



Obrázek 11: Radiálně symetrická distorze: Vlevo původní obraz, vpravo deformace konkávním zkreslením původního obrazu. Upraveno a převzato z (31)

Konvexní zkreslení je definováno zakřivením čar zvětšující se směrem do středu. (*Obrázek 12*)



Obrázek 12: Radiálně symetrická distorze: Vlevo původní obraz, vpravo deformace konvexním zkreslením původního obrazu. Upraveno a převzato z (31)

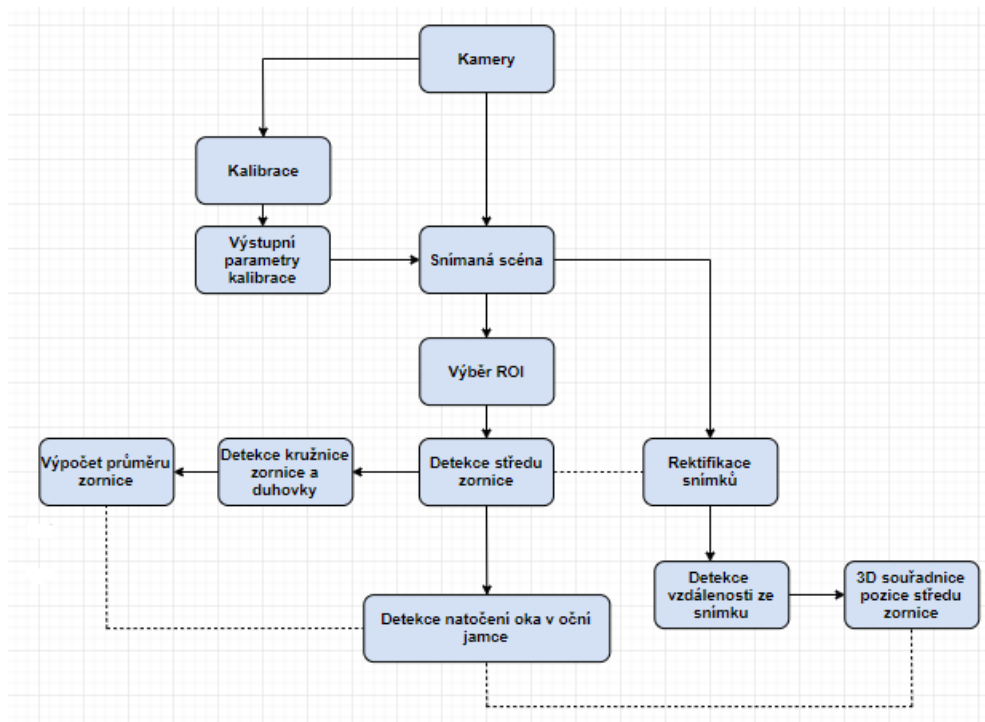
6. Návrh systému pro 3D sledování polohy a pohybu oka oproti mířidlům

První kapitola praktické části je rozdělena do dvou samostatných kapitol, v nichž je popsán teoretický návrh systému pro 3D sledování polohy a pohybu oka. V následující podkapitole je rozebráno technické vybavení realizovaného systému včetně jeho blokového schématu. Druhá kapitola je věnována popisu softwarové části systému.

6.1 Blokové schéma realizovaného systému

Blokové schéma realizovaného systému (*Obrázek 13*) je charakterizováno dvěmi hlavními bloky. Vstupním prvkem blokového schématu je scéna objektu, která je tvořena segmentem obličejové části vymezující zejména oční okolí uživatele/střelce. Kamerový systém je umístěn a nasměrován vhodným způsobem tak, aby obě kamery byly schopné zachytit mířící oko střelce.

Pro zachycení scény očního okolí je použit kamerový systém sestávající ze dvou kamer. Pro tuto práci byly vybrány dvě identické webkamery A4TECH PK-910H, jejichž technické parametry plně postačují pro realizaci snímacího systému. Kamery poskytují vysoké rozlišení videa a snímkovací frekvenci až 30 snímků za sekundu.



Obrázek 13: Blokové schéma realizovaného systému pro sledování polohy a pohybu oka oproti mířidlům

Kamery použité pro prvotní měření pracují s FULL HD rozlišením 1920x1080 a umožňují zachytit video s rozlišením až 2 Mpix. Čočka kamery je opatřena antireflexní vrstvou

zamezující nežádoucím odleskům. Kamery díky integrovanému mikrofonu poskytují přirozený zvuk, avšak tento atribut kamery je nepodstatný, neboť nehraje při zpracování žádnou roli.

6.2 Softwarové vybavení pro realizaci modelu

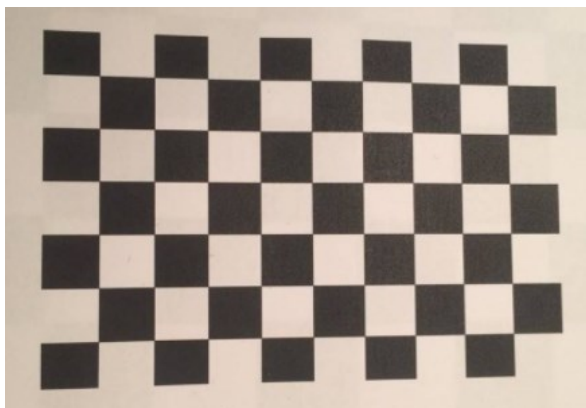
Pro realizaci funkčního model pro sledování polohy a pohybů očí bylo vybráno programové prostředí MATLAB ve verzi R2017a. Programovací prostředí Matlab je využíváno zejména za účelem realizace jednoduchých i složitých výpočtů, simulací, algoritmizací nebo tvorby aplikací v grafickém rozhraní. Nezbytnými součástmi programovacího prostředí jsou tzv. toolboxy, jinými slovy knihovny možných funkcí. V této práci byl využit integrovaný toolbox Image Acquisition pro snímání scén za využití kamer, ve kterém bylo provedeno i základní nastavení parametrů videa. Dále jsem pracovala s knihovnou Computer vision system toolbox, kde jsem využila pro srovnání kalibrační aplikaci.

6.3 Kalibrace kamer pro stereo-vidění

Snímání scény před kamerou předchází její kalibrace. Kalibrace kamer je nezbytná pro zjištění vnitřních (intrinsických) a vnějších parametrů kamer, které jsou zohledněny při 3D rekonstrukci objektu. Intrinsické parametry udávají vnitřní vlastnosti kamer, kterými jsou ohnisková vzdálenost, střed promítání a koeficienty zkreslení. Extrinsické parametry naopak udávají informaci o relativní pozici kamery vůči druhé kameře na základě rotační matice a translačního vektoru.

6.3.1 Kalibrační vzor

Kalibrace kamery je prvním krokem celého optoelektrického systému. Kalibrační proces je prováděn na tzv. kalibračním paternu v podobě kruhových značek nebo šachovnicových políček. Jako kalibrační vzor byla vybrána šachovnice 10x7 políček. Výběr kalibrační šachovnice byl podmíněn dvěma pravidly: Šachovnice bude obdélníkového tvaru. Důležité bylo také dodržení dvou políček černé barvy ve vnějších rozích a naopak dvou políček bílé barvy na protilehlé straně. Kalibrační vzor použitý pro kalibraci systému lze vidět na *Obrázku 14*.



Obrázek 14: Kalibrační vzor pro kalibraci kamer

Vzor pro kalibraci byl vytištěn a upevněn na pevnou podložku, která umožňuje jednodušší manipulaci při snímání scén. Rozměry jednotlivých čtverců šachovnice jsou přesně 15x15 mm, tento údaj je zadáván jako jeden z parametrů do vlastního kódu programu, proto bylo nezbytné jej zaznamenat. Efektivní výsledky kalibrace mimo jiné souvisí i s množstvím zachycených scén s tímto kalibračním vzorem. Pro získání adekvátních výsledků kalibrace bylo nasnímáno celkem 20 sad snímků z obou kamer, což je optimální počet pro provádění kalibrace.

6.3.2 Snímání scény

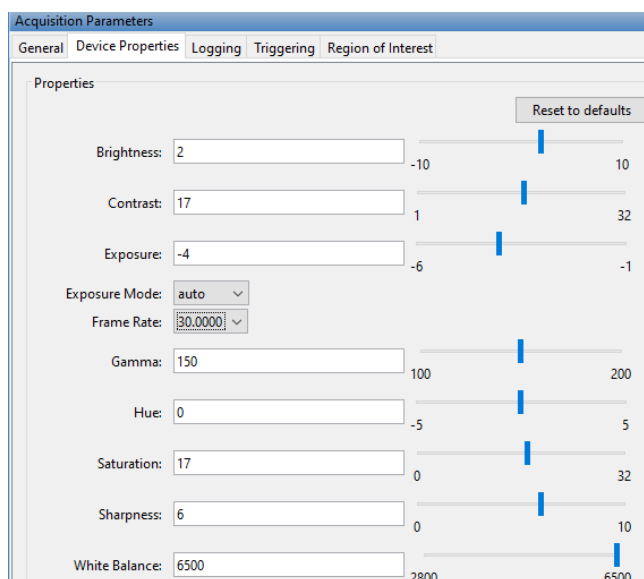
Vstupním prvkem celého řetězce realizovaného modelu je zachycení scény kamerou. Kamera byla připojena univerzální sériovou sběrnicí (USB) k periférii počítače a po jejím spárování bylo možné ji vyhledat v seznamu načtených kamer v imaqttool. Vzhledem k tomu, že notebook má vlastní integrovanou webkameru, bylo nutné vybrat konkrétní kameru ke snímání a spouštění ostatních zakázat. Z nabízených možností rozlišení videa bylo vybráno 640x480 pixelů, které je nejnížší možné pro adekvátní detekci:

```
kamera_prava =videoinput('winvideo', 3, 'MJPG_640x480');

kamera_prava.FramesPerTrigger = 1;

src1= getselectedsource(kamera_prava);
```

Kamera umožňuje zachycení videa v rozlišení FULL/HD (tedy 1920x1080 pixelů), ale vzhledem k nízké snímkové frekvenci kolem 4-5 FPS bylo použito nižší rozlišení se snímkové frekvencí 30 FPS. Kromě navolení rozlišení je nutné zvolit formát přenosu, který byl nastaven v sekci parametrů akvizice jako RGB. V záložce vlastností jsou defaultně nastaveny parametry kontrastu, jasu, odstínu, saturace, ostrosti a jiné, které byly manuálně nastaveny. (Obrázek 15)



Obrázek 15: Nastavení parametrů snímaného obrazu

Úpravu scény lze kontinuálně sledovat při spuštění náhledu, kde se změny nastavení projevují okamžitě. Jakmile jsou nastaveny veškeré nezbytnosti před vlastním snímáním, je možné přistoupit k nasnímání scény.

Počet nasnímaných scén bylo nastaveno na 20 obrazů z levé kamery a 20 obrazů z pravé kamery. Kalibrační vzor bylo nutné nasnímat pro obě kamery ve stejné pozici.

```
num_of_images = 20;
```

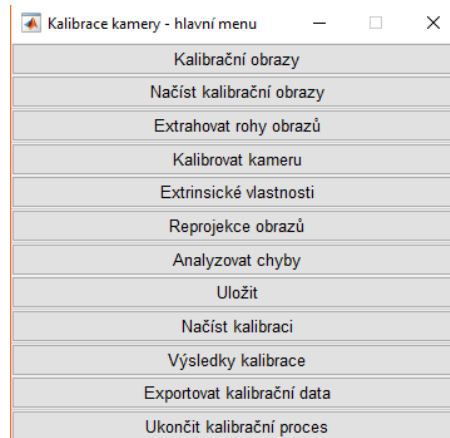
Zachycené snímky z obou kamer byly automaticky ukládány do požadovaného adresáře s názvem left_ resp. right_ a přírůstkovým číslem ve formátu .jpg.

```
for i = 1:1:num_of_images
    img1 = getsnapshot(kamera_prava);
    img2 = getsnapshot(kamera_leva);
    filename1=sprintf('leva/left_%02d.jpg',i);
    filename2=sprintf('prava/right_%02d.jpg',i);
    imwrite(img1,filename1);
    imwrite(img2,filename2);
end
```

Šachovnicový vzor je nutné polohovat v co nejružnějších orientacích vzhledem ke kamerám, aby bylo možné stanovit deformace a zkreslení objektivu. Kalibrační vzor byl polohován tak, aby vyplňoval téměř veškerou zachycenou scénu a zároveň, aby byl celý viditelný oběma kamerami. Tato kontrola probíhala během snímání, pakliže byl vzor chybně nasnímán, byl manuálně z adresáře vyřazen.

6.3.3 Kalibrační toolbox

Toolbox pro vlastní kalibraci byl vypracován v grafickém uživatelském rozhraní (GUI) programu Matlab umožňující využití interaktivních ovládacích prvků. Kalibrační toolbox je tvořen skripty a jednotlivými funkcemi, které jsou postupně vyvolávány. Hlavní menu je sestaveno z interaktivního listu obsahující 12 bloků, které jsou postupně při procesu kalibrace procházeny. (*Obrázek 16*) V tomto kalibračním programu je nutné kalibrovat jednotlivé kamery zvlášť. Nejprve byla provedena kalibrace levé kamery, poté kalibrace kamery pravé. Exportovaná data z obou kamer jsou následně importována do samostatného toolboxu pro kalibraci stereo-páru, které je věnována samostatná kapitola.



Obrázek 16: Hlavní menu kalibračního toolboxu

Dříve nasnímaná a uložená obrazová data jsou importována do kalibračního programu ikonou Kalibrační obrazy. Pro výběr konkrétních dat je nutné do Command Window vepsat název dat bez přírůstkového čísla, tedy `left_`.

```
fprintf(1, '\n');
calib_name = input('Zadejte název kalibračního obrazu: ', 's');
```

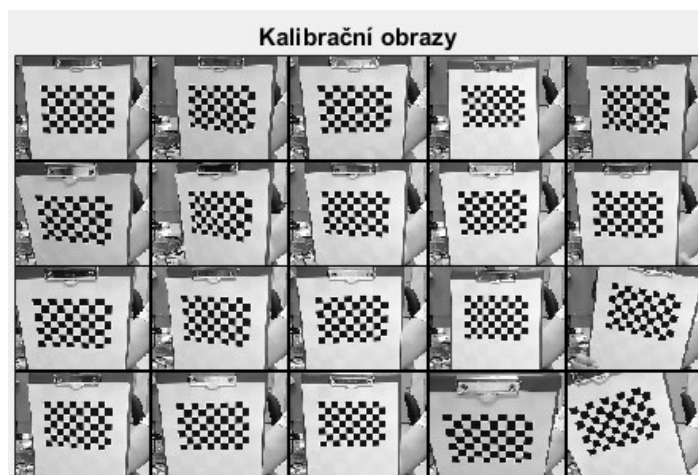
Pakliže data s uvedeným názvem existují v adresáři, je nutné vybrat formát, ve kterém se data nacházejí. Vybírat lze z formátů .bmp, .tif, .jpg, nebo .ppm a to po zadání prvního písmene zkratky.

```
format_image = input('Vyberte formát: 'b'='bmp', 't'='tif', 'j'='jpg', 'm'='ppm') ', 's');
```

Nesprávným zadáním názvu dat nebo formátu je vypsána v obou případech chybová hláška.

```
l_bmp = dir('*bmp');
s_bmp = size(l_bmp,1);
l_tif = dir('*tif');
s_tif = size(l_tif,1);
s_tot = s_bmp + s_tif + s_jpg + s_ppm;
if s_tot < 1,
    fprintf(1, 'Obraz není v žádném z povolených formátů, \n');
    return;
end;
```

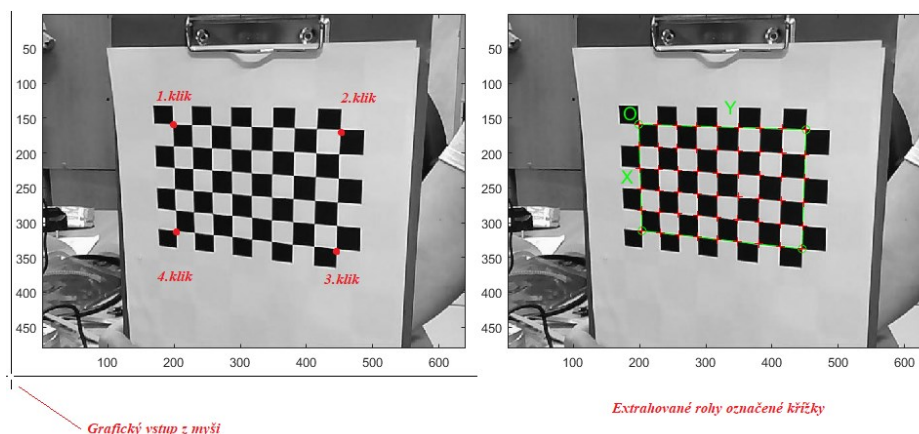
V případě, že jsou zadány parametry odpovídající, obrazová data jsou zobrazena ve stupních šedi ve struktuře mozaiky a jejich počet je uložen v proměnné s názvem `n_ima`. (Obrázek 17).



Obrázek 17: Kalibrační obrazy

Importovat obrazová data lze pouze i přistoupením k druhému bloku menu Načíst kalibrační data, avšak bez náhledového zobrazení kalibračních obrazů.

Blok s názvem Extrakce rohů kalibrační mřížky je jeden z nejdůležitějších pro výslednou kalibraci kamery. Stěžejní pro tento funkční blok je manuální označení 4 vnějších rohů šachovnicového paternu na každé obrazové scéně. Významnou roli hraje postup při označování jednotlivých rohů šachovnice, který musí být zachován pro jednotné vymezení souřadnicového systému. (Obrázek 18)



Obrázek 18: Extrakce rohů kalibračního paternu: Postup při zaznačení jednotlivých rohů podle stanoveného pravidla.

Vstup do programu je podmíněn potvrzením počtu obrazů, které chceme zahrnout do procesu kalibrace. Jednoduchým potvrzením klávesou je automaticky do procesu extrakce zahrnut veškerý obsah adresáře s názvem dat, který byl zadán v předchozích krocích, a to buď při náhledovém nebo beznáhledovém načtení obrazových dat. V případě, že vyžadujeme použití pouze konkrétních snímků, zadáváme je ručně vypsáné v hranaté závorce. Tímto způsobem lze eliminovat nevhodné snímky, které by jistým způsobem zkreslily proces kalibrování kamer a výsledné hodnoty parametrů kamer by byly negativně ovlivněny. Pro označování vnějších rohů kalibračního paternu a tedy identifikaci konkrétního bodu na scéně je využit grafický kurzor umístěvaný myší. Grafický vstup umožňuje zaznamenat bod v souřadnicovém systému.

```
function [out1,out2,out3] = ginput4(arg1)

[out1,out2,out3] = ginput(arg1);

return;
```

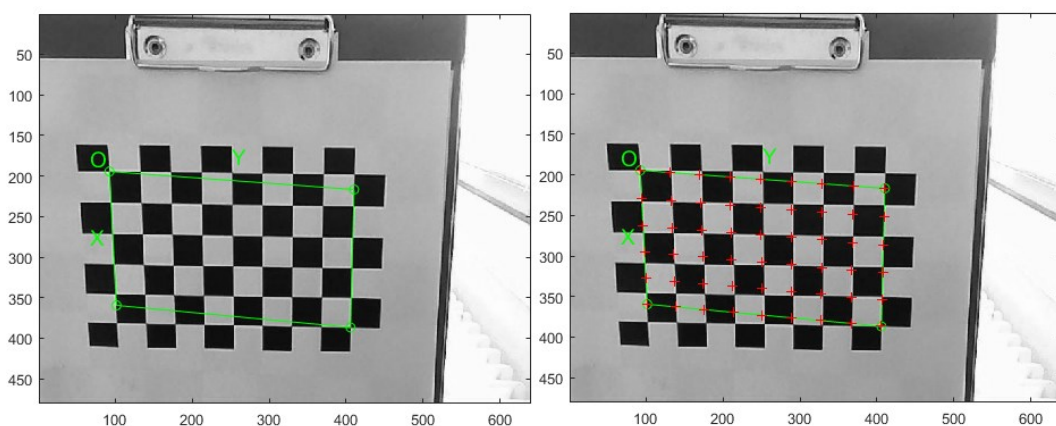
Velikost kurzoru je defaultně nastavena na 11x11 pixelů, což představuje optimální velikost pro pohodlné označování jednotlivých rohů šachovnice. Schopnost detekce jednotlivých rohů šachovnice je mimojiné závislá na správně zadané hodnotě velikosti čtverců šachovnice. Jednotlivé čtverce šachovnice mají rozměry 15x15 mm, a protože byl pro kalibraci použit pouze tento kalibrační vzor, je tento parametr nastaven defaultně.

```
if ~exist('dX_default')|~exist('dY_default');

    dX_default = 15;

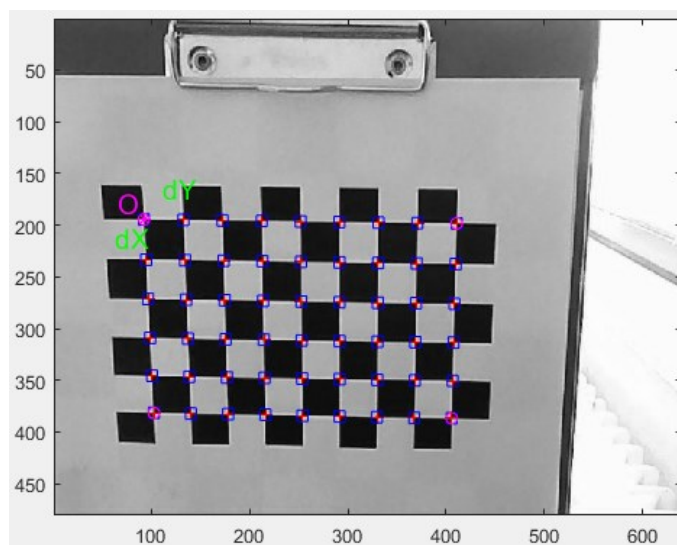
    dY_default = 15
```

Následně je zobrazena sada snímků, které byly vybrány k extrakci rohů a na těchto snímcích postupně označujeme vnější rohy tak, jak je uvedeno na *Obrázku 18*. Zásadní je dodržet postup v označování, aby veškeré snímky byly označovány ve stejném pořadí a snažit se co nejpřesněji označit roh. Po označení vnějších rohů mřížky je ihned zobrazena vnější hranice kalibračního vzoru a jednotlivé rohy mřížky, které jsou označené červenými kříži. Jestliže bylo naše označení rohů přesné, pak i program na základě udaných parametrů predikoval přesné křížení v rozích. V případě, že tato křížení jsou nepřesná (*Obrázek 19*), je nutné provést extrakci rohů znovu.



Obrázek 19: Příklad chybného označení vnějších rohů při extrakci

Extrakce je dokončena po označení rohů všech použitých snímků a výstupem jsou snímky, na kterých jsou zaznačeny predikované rohy, počátek souřadnicového systému (označeno fialovou barvou) a čtvercové kurzory (modrá barva) představující velikost grafického vstupu 11x11 pixelů. (*Obrázek 20*)



Obrázek 20: Výstup extrakce rohů kalibračního vzoru

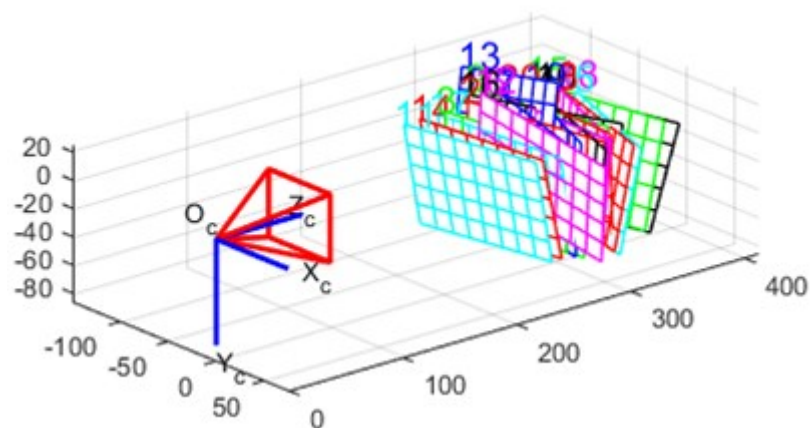
Pokud s výslednou extrakcí nejsme spokojeni, je nutné ji provést znovu, správně zadat velikost čtverečků šachovnice a zejména provést přesné označení vnějších rohů. Jestliže jsme s výsledkem extrakce spokojeni, můžeme přistoupit k vlastní kalibraci kamery.

Kalibraci kamery spustíme příslušným interaktivním blokem. Tento proces je tvořen dvěma fázemi, kdy v počáteční fázi jsou vlastnosti kamery definovány bez zkreslení. Naopak druhá fáze kalibrace umožňuje výsledky kalibrace optimalizovat a zahrnuje i vypočítané nejistoty. Výsledné hodnoty kalibrace jsou vypsány jako informace do Command Window. (Tabulka 2)

Tabulka 2 : Vnitřní parametry kamery získané kalibrací

<i>Parametry</i>	Hodnoty vnitřních parametrů
<i>Ohnisková vzdálenost [pix]</i>	[778,89012; 775,02459] +/- [18,07862;17,51069]
<i>Hlavní bod [pix]</i>	[319,5; 239,5]
<i>Šikmost [-]</i>	[0,00000] => úhel os je 90°
<i>Distorze [-]</i>	[0,00687; 0,24820; -0,00915]

Kalibrací získáváme parametr ohniskové vzdálenosti vyjádřenou v pixelech, souřadnice hlavního bodu také v pixelech a údaje definující šikmost a zkreslení čočky. Vnější parametry kalibrované kamery získáme po otevření bloku Extrinsicke vlastnosti, které nám umožňují zobrazit pozici kamery ve 3D systému a všech kalibračních patrnů s ohledem na kameru. (Obrázek 21)

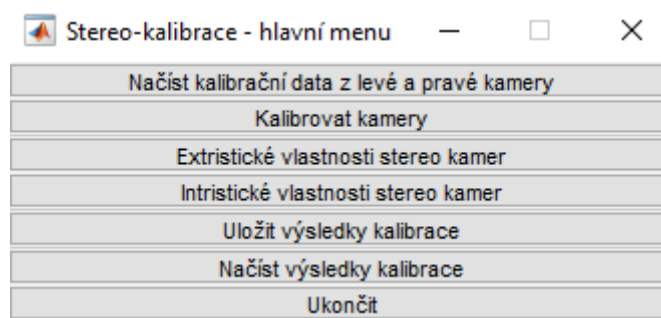


Obrázek 21: Vizualizace vnějších parametrů kamery vůči kalibračním vzorům.

Na obrázku výše lze vidět umístění kamery spolu s definovaným souřadným systémem $[X_c; Y_c; Z_c]$, kde počátek je definován souřadnicí O_c . Kamera je vyobrazena červeným jehlanem a jeho podstava představuje efektivní zorné pole kamery.

Výsledky kalibrace ukládáme stisknutím tlačítka Uložit ve formě matice pod názvem Calib_results_left.mat. Stejným způsobem provedeme kalibraci pro pravou kameru a následně uložíme data pod názvem Calib_results_right.mat. Jakmile máme připravena data z obou samostatných kalibrací, je možné provést stereokalibraci.

Stereokalibraci spouštíme vyobrazením hlavního menu, které je jako v předešlém případě kalibrace jedné kamery, vytvořeno v interaktivním prostředí GUI. Hlavní menu (Obrázek 22) je tvořeno sedmi bloky, které na sebe navazují. Nejprve je nutné načíst kalibrační data z předešlých kalibrací v příslušných formátech.



Obrázek 22: Hlavní menu stereo-kalibrace

Načtení je provedeno po zadání dat s názvy Calib_results_left a Calib_results_right, pakliže nejsou data v požadovaném formátu, je vyobrazena chybová hláška o neexistenci požadovaných dat.

```

if isempty(calib_file_name_left),
    calib_file_name_left = 'Calib_Results_left.mat';
end;

if isempty(calib_file_name_right),
    calib_file_name_right = 'Calib_Results_right.mat';
end;

if
    (exist(calib_file_name_left)~=2) | (exist(calib_file_name_right)
    ~=2),

    fprintf(1,'Error: Kalibrační data neexistují,\n');

    return;

end;

```

(32)

Po načtení obou datových souborů proběhne vypsaní jednotlivých parametrů obou kamer do Command Window. Parametry, které jsou vypsané jako info, jsou původní před následným přepočtem ve smyslu stereokamer. Pro nalezení rotační matice je využit Rodriguesův rotační vzorec, který je využíván v algoritmu pro výpočet rotační vektoru vzhledem k ose a úhlu natočení.

```

dRdin = [0 0 0; 0 0 1; 0 -1 0;
0 0 -1; 0 0 0; 1 0 0;
0 1 0; -1 0 0; 0 0 0];

```

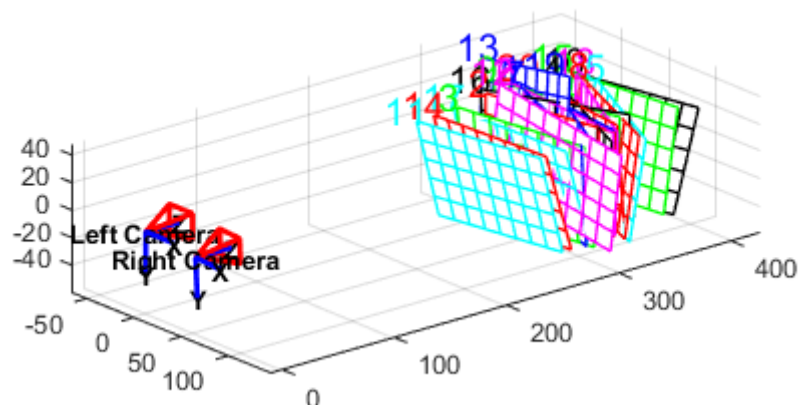
Tímto zápisem je vyjádřen rotační vektor pro osy X, Y a Z a níže je vyjádřena jeho rotační matice pro osy ve 3D souřadnicích:

```

dm1dm2(1,4) = -sin(theta);
dm1dm2(2,4) = cos(theta);
dm1dm2(3,4) = sin(theta);
dm1dm2(4:12,1:3) = [0 0 0 0 0 1 0 -1 0;
0 0 -1 0 0 0 1 0 0;
0 1 0 -1 0 0 0 0 0]';

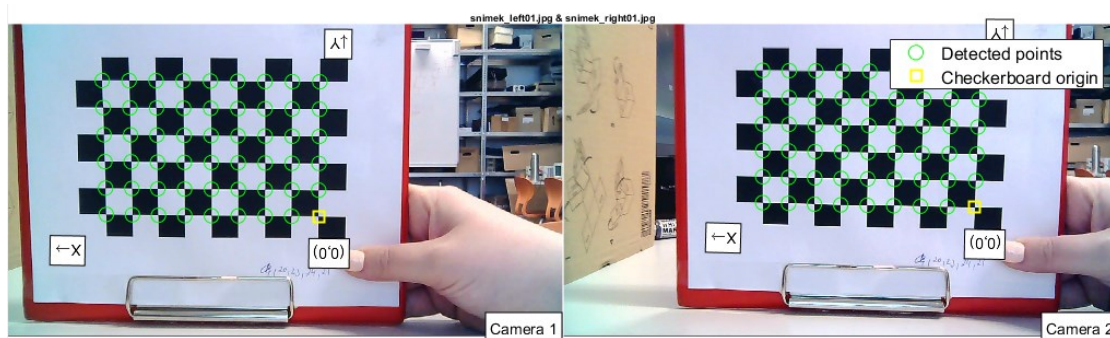
```

Parametry obou kamer jsou zobrazeny včetně rotačního a translačního vektoru. Po kalibraci jsou parametry přepočítány s ohledem na jejich nepřesnosti, což vede ke snížení množství chybných reprojekcí. Pozice kamer vůči sobě lze zobrazit pomocí bloku Extrinsicé vlastnosti kamer. (Obrázek 23)



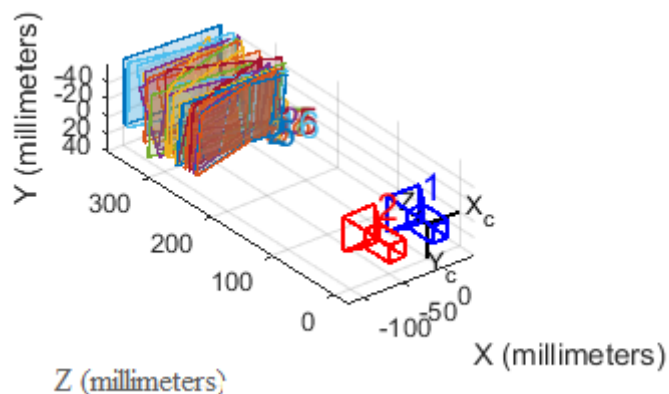
Obrázek 23: Vizualizace stereo páru

Pro ověření přesnosti stanovení vnějších a vnitřních parametrů kamer byla pro srovnání použita aplikace MATLAB pro stereokalibraci kamer. Aplikace Stereo Camera Calibrator je rychlejší, neboť provádí kalibraci automaticky po nahrání stereo párů snímků. V aplikaci odpadá nutnost manuální extrakce rohů kalibračního vzoru, který musí splňovat stanovené atributy. Kalibrační vzor nesmí být čtvercového tvaru a zároveň musí začínat tmavým políčkem a končit naopak políčkem bílým, aby byl vhodně zvolen počátek souřadného systému. Příklad nevhodně zvoleného počátku souřadného systému kalibračního vzoru lze vidět na *Obrázku 24*.



*Obrázek 24: Detekce bodů kalibračního vzoru aplikací Stereo Camera Calibrator:
Nevhodně detekovaný počátek souřadného systému vpravo dole*

Aplikace v levé části okna zobrazuje stereo páry snímků, na kterých jsou detekovány rohy šachovnice, a jednotlivé páry je možné si detailně prohlédnout. Do aplikace jsem se pokusila záměrně nahrát i dva snímky, které si měly odpovídat, ale byly zachyceny v rozdílných pozicích. Aplikace na tento pár reagovala chybovou hláškou a z kalibračního procesu byl vyřazen. Stisknutím tlačítka Calibrate spustíme proces kalibrace, jehož výstupem je soubor vnitřních parametrů, které lze exportovat přímo do Workspace. Vnější parametry kamer jsou zobrazeny ve formě 3D grafu na *Obrázku 25*.



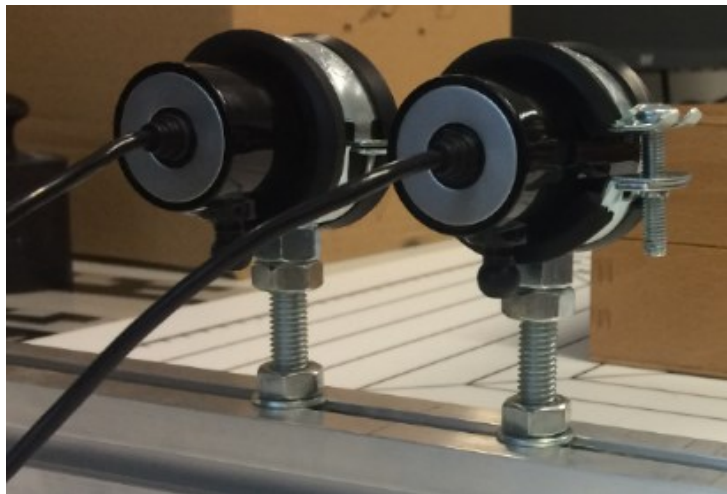
Obrázek 25: Vizualizace stereo páru kamer aplikací Stereo Camera Calibrator

Oběma způsoby kalibrace získáme téměř totožné výsledky vnitřních a vnějších parametrů, které lze pozorovat na při srovnání *Obrázku 23 a 25*.

6.3.4 Návrh systému pro 3D sledování polohy oka

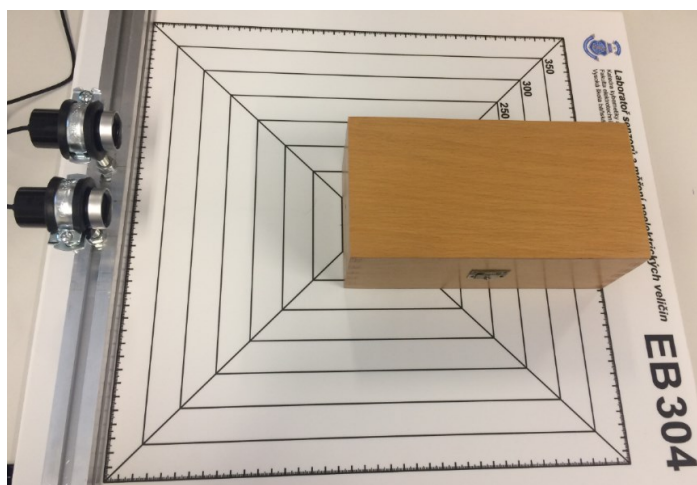
Systém pro 3D sledování polohy oka vychází z principů fotogrammetrie, na základě které je ze dvou kalibrovaných kamer zachycena stejná scéna. Ze zachycených snímků lze dopočítat rozměry předmětu, jeho souřadnice nebo rekonstruovat tvary předmětů. Vzhledem k požadavku sledování polohy oka jsem se zaměřila na detekci středu zornice oka a výpočtu jeho souřadnic ve 3D systému. Před určováním 3D souřadnic středu zornice jsem provedla zkušební testování pro stanovení 3D souřadnice stanoveného bodu ve scéně. Popisu měření vzdálenosti a jeho vyhodnocení je věnována samostatná kapitola *Opakované měření vzdálenosti navrhnutým systémem*

Kamery použité pro snímání scény bylo nutné upevnit v nosné konstrukci, která zajišťuje neměnné vlastnosti získané kalibrací. Kamery byly uchyceny trubkovými jednošroubovými objímkami, které byly zasazeny do železného hranolu (*Obrázek 26*). Vzhledem k objemnosti použitých objímek jsou kamery od sebe 6 cm. Vzdálenost 6 cm je definovaná jako triangulační báze, která je zohledněna při výpočtu třetího rozměru ze snímků. Je nutno podotknout, že aby měření bylo co nejpřesnější, tak by triangulační báze měla být co největší s ohledem na společný viditelný prostor. Nicméně vzhledem k tomu, že kamery budou snímat oční okolí, tak pro detekci kruhu zornice a jejího středu musí být kamery ve vzdálenosti cca 10 cm od oka. Z tohoto důvodu není možné ve společném viditelném prostoru nalézt na obou snímcích stejný bod (myšleno střed zornice), tento fakt je ovlivněn zobrazovacím úhlem kamer.



Obrázek 26: Nosná konstrukce stereo-páru kamer

Pro zkušební měření jsem sestavila pracovní plochu, která se skládala z nosné konstrukce s kamerami, odměřovacího pole a předmětu, jehož vzdálenost ve scéně byla měřena. Jako odměřovací pole posloužila krychlová podložka s naznačenými čtverci, které byly 2,5 cm vzájemně od sebe vzdáleny. Měřeným předmětem byl kvádr, v jehož čelní straně byl zaznačen jeho střed. Tento bod je důležitý z hlediska vyhledávání konkrétního bodu v obou scénách. Měřicí pole je vyobrazeno na *Obrázku 27*.



Obrázek 27: Měřicí pole pro určování 3D souřadnic bodu

Prvním krokem pro určování 3D souřadnic určitého bodu je nasnímání scény. Snímání scény probíhá pomocí stejného algoritmu, jako byl použit při snímání kalibračního paternu, avšak jsou pochopitelně změněny cesty pro ukládání snímků do adresářů a jejich názvy. Snímky jsou automaticky ukládány do adresářů jako snímky zachycené pravou a levou kamerou. Následně je nutné provést rektifikaci snímků. Rektifikace představuje takovou úpravu, že výsledné snímky jsou promítány do společné roviny a každý pixel obrazu představuje hloubku příslušného bodu v zachycené scéně. Jakmile jsou snímky rektifikovány, lze nalézt v jedné scéně bod - pixel, který odpovídá pixelu ve druhé scéně. Na základě triangulace je vypočítán třetí souřadnice. Rektifikace

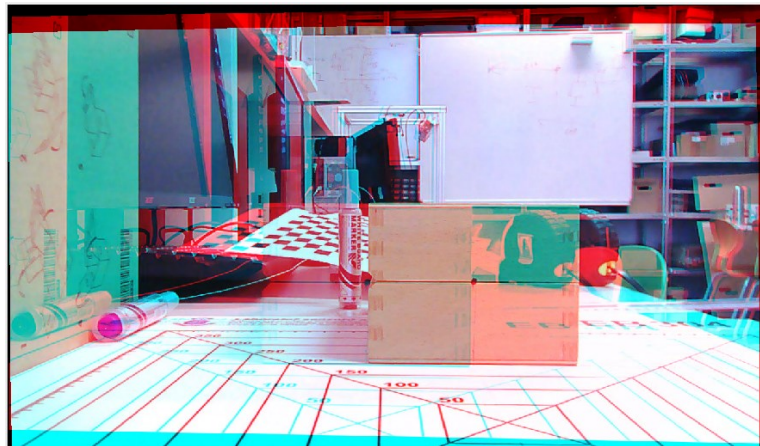
byla provedena na základě dvou snímků za využití parametrů získaných kalibrací (stereoParams):

```
% Načtení stereo páru  
I1 = imread('kostka100_left01.jpg');  
I2 = imread('kostka100_right01.jpg');  
  
% Rektifikace snímku  
[J1, J2] = rectifyStereoImages(I1, I2, stereoParams,  
    'OutputView', 'Full');
```

Rektifikovaný snímek je zobrazen na *Obrázku 28*, kde lze pozorovat kombinaci modročervených barev představující právě snímek z pravé a levé kamery.

```
figure;  
imshow(stereoAnaglyph(J1, J2), 'InitialMagnification', 50);  
title('Snímky po rektifikaci'); (33)
```

Rektifikované snímky jsou následně ukládány do příslušných adresářů a je možné je použít pro další zpracování.



Obrázek 28: Výsledek rektifikace snímků zachycených pravou a levou kamerou

Stanovení třetího rozměru z 2D scény je umožněno na základě triangulačního výpočtu, kde je nutné znát parametr triangulační báze, ohniskovou vzdálenost a paralaxu p . Paralaxa p značí úhlovou změnu pozice, která je definována jako:

$$\text{paralax} = x_1(i) - x_2(i);$$

Parametr x_1 je definován jako průmět bodu na první detektor kamery, x_2 naopak jako průmět téhož bodu na druhý detektor kamery. Bod, jehož vzdálenost vůči kamerám měříme, je zaznačen na čelní straně kvádra a tento bod je zaznačen manuálně ve snímku z levé i pravé kamery.

```

figure(1);
imshow(img1);
[x1(i),y1(i)] = ginput(1);
figure(2);
imshow(img2);
[x2(i),y2(i)] = ginput(1);

```

Souřadnice konkrétního bodu získáme pomocí výpočtů vycházejících z rovnic sestavených na základě fotogrammetrických technik, kde *base* definuje triangulační bázi, *paralax* definuje úhlovou změnu pozice bodu. Parametr *f* je zadávám po kalibraci a umožňuje určit souřadnici *Z*, tedy vzdálenost bodu od kamer.

```

X(i) = x1(i)*base/paralax;
Y(i) = y1(i)*base/paralax;
Z(i) = f*base/paralax;

```

Výsledné souřadnice měřeného bodu jsou vypsány jako informace v Command Window.

7. Realizace funkčního modelu

Realizovaný model pro vyhodnocování polohy a pohybu oka oproti mířidlům je tvořen několika funkčními bloky. Funkční model je tvořen dvěma samostatnými programy, z nichž první je zaměřen na nastavení kamer a jejich kalibraci, na základě které probíhá automatický výpočet vzdálenosti oka od kamer. Tento program je popsán v předešlé kapitole Návrh systému pro 3D sledování polohy oka. Druhý blok programu je zaměřen na samotnou detekci duhovky spolu s výpočtem jejího natočení a podrobně bude rozebrán v této kapitole.

7.1 Snímek

Snímek vstupující do funkčního řetězce je nutné upravit. Nejprve jsou zadávány parametry formátu, ve kterém bude uložen, jedná se o formát mjpg s rozlišením 1280x720 pixelů. S ohledem na vzdálenost, ve které je kamera upevněna na vzduchové pušce, je snímek dostatečně ostrý pro detekci oční duhovky a následného výpočtu natočení.

7.2 Detekce oka z obrazu

Detekce očí byla provedena z pořízených snímků vstupujících do funkčního bloku určeného k přímé detekci očí. Detekovat oční okolí ze snímku je umožněno na základě využití Computer vision system toolboxu, který je implementován ve využitém programovém prostředí. Schopnost detekovat objekty, v případě této diplomové práce zaměřené na oko, závisí na správné implementaci kaskádního objektového detektoru. Kaskádní objektový detektor (vision.CascadeObjectDetector System) tvoří Viola-Jones algoritmus, který je kromě jiného využíván v aplikacích detekujících např. nejruznější části těla, ať se jedná o horní polovinu těla jako celek, hlavu, obličej nebo jeho části jako jsou oči, uši, nos nebo ústa.

Součástí kaskádového detektoru objektů je klasifikační algoritmus, jehož funkce vychází ze strojového učení. Principem strojového učení je selekce klasifikátorů ze základní množiny, která se nazývá trénovací množina. Následně dochází ke zvětšování počtu klasifikátorů a vzniká tak soubor se silnými klasifikátory. Aby bylo možné provést detekci očí z obrazu, je nutné mít k dispozici konkrétní trénovací množinu obsahující vzory snímků oka a vzory snímků pozadí. Vzory obrazů jsou použité pro natrénování algoritmu, jehož výstupem je množina příznaků klasifikátorů, na základě kterých probíhá detekce. Vstupní snímek je funkcí rozebírán postupně pomocí podokna zobrazující postupně jednotlivé části snímku. Klasifikátory je stanoveno, zda se ve vybrané oblasti nachází objekt zájmu nebo nikoliv. V důsledku kaskádového řazení klasifikátorů je docíleno vysoké výpočetní doby detektoru. Vzhledem k obrovské výpočetní náročnosti a zpracování diplomové práce v programovém prostředí MATLAB, byla využita implementovaná funkce detektoru včetně natrénované množiny.

Algoritmus pro detekci očí byl upraven pro detekci pouze pravého oka, neboť právě toto oko je u většiny lidí tzv. mířící. Parametrem *BB* získáváme podokno prohledávání snímku, jenž vrací hodnoty matice *M* definovaných na základě počtu detekovaných objektů na vstupním snímku *I*.

```

RightEyeDetect = vision.CascadeObjectDetector('RightEye');
BB=step(RightEyeDetect, imresize(orig, 1/index));
while size(BB,1) > 1
    index = index + 1;
    I = imresize(orig, 1/index);
    BB=step(RightEyeDetect, I);
End

```

(33)

Výstupním argumentem detekce je matice, jejíž každý řádek představuje 4-členný vektor V . Vektor V je tvořen specifickými prvky $V = [x, y, \text{výška}, \text{šířka}]$ a definuje tak oblast zájmu ve snímku (tzv. ROI). Parametry x a y označují souřadnice levého horního rohu ohraňujícího podokna, dalšími parametry vektoru jsou jeho výška a šířka.

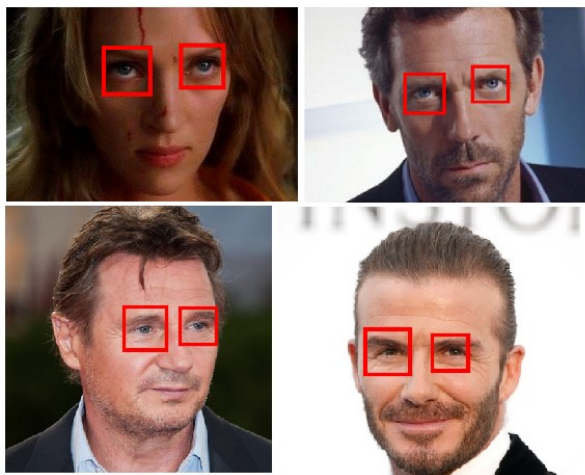
Před vlastní detekcí je vhodné definovat největší předpokládanou velikost detekovaného objektu v pixelech. Pakliže tento atribut nenadefinujeme, detektor ji automaticky nastaví podle velikosti originálního snímku I před jeho zpracováním na úkor výpočetní rychlosti algoritmu.

```

maxArea = 0;
for i = 1:size(BB, 1)
    if(BB(i, 3) * BB(i, 4) > maxArea)
        maxArea = BB(i, 3) * BB(i, 4);
        index = i;
    end
end

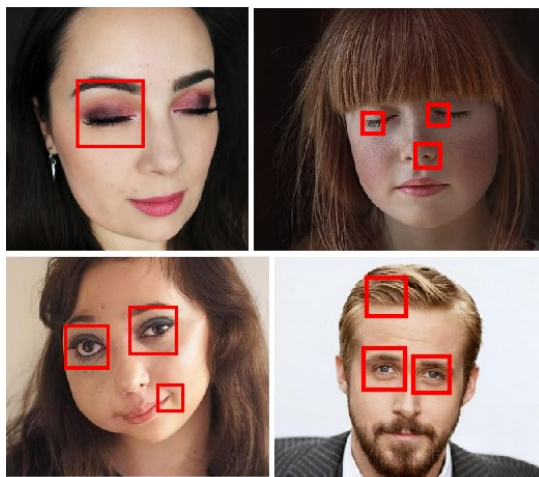
```

Výstupy úspěšně detekovaných očí lze vidět na *Obrázku 29*, kde je možné si všimnout i rozdílně velikých ohraňujících podoken.



Obrázek 29: Výstupy vlastní úspěšné detekce očí

Opačným případem je špatně provedená detekce, kterou zejména ovlivňuje nedostatečné natrénování klasifikační množiny. Výsledek takovéto detekce lze vidět na *Obrázku 30*.



Obrázek 30: Výstupy neúspěšné detekce očí

7.3 Funkce detekce oční duhovky

Proces detekování oční duhovky probíhá na snímku vstupujícího do programu, kde veškeré zachycené scény jsou vyvolávány z příslušného adresáře. Oblast zájmu ROI byla vybírána opět na základě použití Viola-Jones algoritmu a následně byla pro detekci duhovky využita Houghova kruhová transformace (*Obrázek 31*). Houghova transformace je využívána pro nalezení jednoduchých tvarů v obraze, kdy ve svých počátcích se zaměřovala na přímky a později na detekci kružnic a elips. Použití této kruhové transformace je výpočetně jednodušší a přesnější než Daugmanův algoritmus, a právě z tohoto důvodu byla v této práci využita.

Houghova kruhová transformace umožňuje nalézt podmnožinu bodů, jež se tvarově shodují nebo alespoň přibližují hledané entitě. Podmnožina hledaných bodů je hledána na základě podobnosti určeného vzoru, v našem případě kružnice. Kružnice je definována rovnicí:

$$(x - x_0)^2 - (y - y_0)^2 = r^2; \quad (7.1)$$

kde parametry x a y vyjadřují souřadnice bodů na kružnici, parametry x_0 a y_0 definují střed kružnice, jejíž poloměr představuje parametr r . Vzhledem k parametrickému výstupu Houghovy transformace lze popsat každý bod kružnice s poloměrem r a středem v bodech $[x_0, y_0]$ jako:

$$x = x_0 + r \cos \varphi; \quad (7.2)$$

$$y = y_0 + r \sin \varphi. \quad (7.3)$$

Ze souboru nalezených bodů jsou následně vyjmuta maxima bodů, které se v nejvyšší míře shodují se vzorem. Informace o pravděpodobnost výskytu hledané entity je obsažena v Houghově prostoru.



Obrázek 31: Detekce duhovky pomocí Houghovy kruhové transformace

Důležitou součástí Houghova prostoru je pole akumulátoru představující soubor hraničních bodů získaných na základě hledání lokálních maxim bodů.

```
% Hledání lokálních maxim v akumulátoru
y0detect = []; x0detect = [];
AccumulatorbinaryMax = imregionalmax(Accumulator);
[Potential_y0 Potential_x0] = find(AccumulatorbinaryMax ==
1);
Accumulatortemp = Accumulator - thresh;
for cnt = 1:length(Potential_y0)
if Accumulatortemp(Potential_y0(cnt),Potential_x0(cnt)) >= 0
y0detect = [y0detect;Potential_y0(cnt)]; %horizontální
souřadnice detekovaných kružnic
x0detect = [x0detect;Potential_x0(cnt)]; %vertikální
souřadnice detekovaných kružnic
end
```

(33)

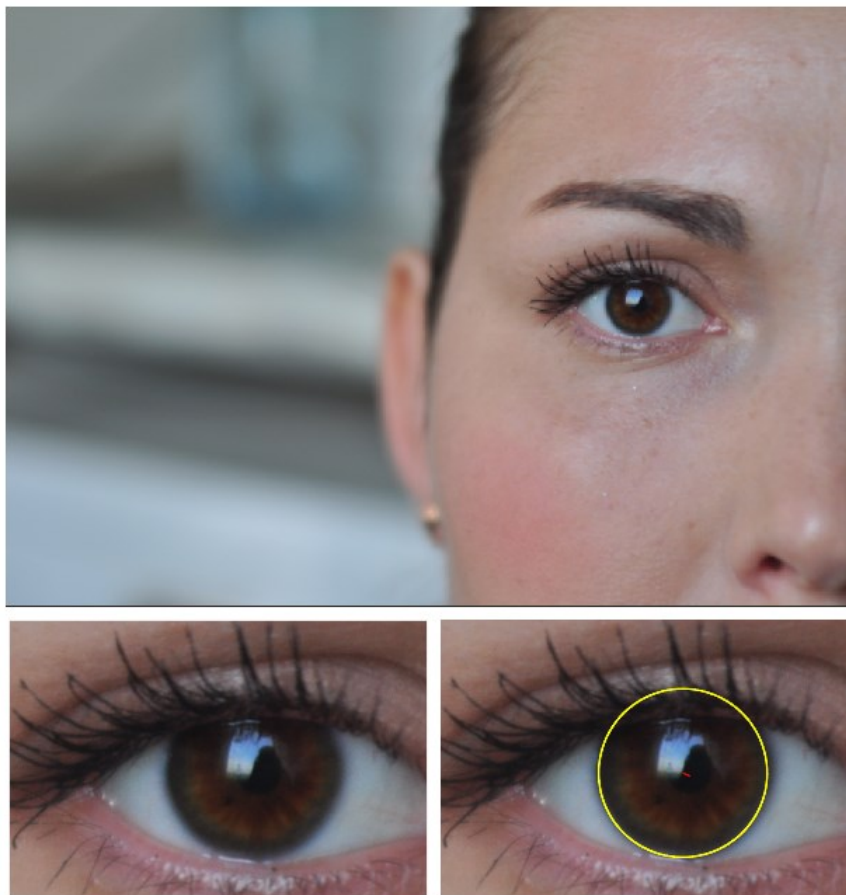
Vyhledání lokálních maxim je podmíněno výběrem dostatečně vysoké hodnoty prahu. Prahová hodnota byla v tomto případě nastavena na minimální hodnot 4, což odpovídá minimálnímu počtu pixelů nacházejících se uvnitř kružnice.

7.4 Funkce detekce natočení oční duhovky

Schopnost natočení oční duhovky, respektive oka v oční jamce, je sledováno oproti kamerám, jež jsou ekvivalentem pro mířidla. Kamerami je zaznamenáno natočení a jeho vyhodnocení, jež poskytuje zpětnou vazbu trenéru, který je na základě těchto výsledků schopen hodnotit úroveň žáka. Tento parametr nebylo možné dosud hodnotit, neboť z bezpečnostního hlediska není možné, aby se trenér vyskytoval před mířícím střelcem.

Funkce detekce natočení oční duhovky přímo navazuje na schopnost detekce zornice a duhovky. Princip této detekce je závislý na schopnosti přesného výběru zájmové oblasti očního okolí. Vycházím z předpokladu, že zachycené oko se nachází ve středu oblasti zájmu a zároveň,

že ve středu zachyceného obrazu se bude nacházet střed zornice s nulovým vychýlením v rámci horizontální i vertikální osy. Vstupní snímek a výsledek detekce natočení je možné vidět na *Obrázku 32*.



Obrázek 32: Detekce natočení oční bulvy v oční jamce: Foto nahoře – původní snímek, foto vlevo – výběr zájmové oblasti, foto vpravo – detekce duhovky včetně natočení.

```
roi = imcrop(orig, BB(best,:) * index); %výběr zájmové
oblasti

BB = step(LeftEyeDetect, roi);

figure

eye = imcrop(rooi, BB(index, :));

imshow(eye);

hold on;

gray = rgb2gray(eye);

[xs1, ys1, radius, xp1, yp1, gray] = hranice_edit(gray,
180:180);

plot((xs1 + xp1), (ys1 + yp1), '.y')
```

Pro získání výsledného úhlu bylo nutné vypočítat počet pixelů, které představují plochu vychýlení od pomyslného středu zornice bez vychýlení. Pomocí výpočtu, při kterém byla použita kosinová funkce, získávám úhel, o který je oční koule vychýlena.

```
center = [size(eye, 2) / 2, size(eye, 1) / 2];  
point = [xs1, ys1];  
eye_r = size(eye, 2) / 2;  
normalised = [point(1) - center(1), point(2) - center(2)];  
angleA = -acos(normalised(1) / eye_r) + (pi / 2);  
angleB = -acos(normalised(2) / eye_r) + (pi / 2);
```

Úhel je definován jak v horizontálním tak vertikálním směru, a to v radiánech. Jednoduchým přepočtem lze získat úhel natočení oka ve stupních. Výsledné hodnoty úhlů, včetně dalších parametrů lze vyčíst ve Workspace programu.

8. Statistické vyhodnocení a zhodnocení experimentálních dat

8.1 Opakované měření vzdálenosti navrhnutým systémem

Pro ověření funkčnosti programu pro výpočet třetího rozměru konkrétního bodu bylo provedeno několik zkušebních měření, na základě kterých byla stanovena chyba měření a statisticky vyhodnocena získaná data. Měření bylo provedeno na celkem 7 vzdálenostech za konstantních okolních podmínek. Každá jednotlivá vzdálenost byla měřena 10 x, a na základě této opakovatelnosti byla stanovena absolutní a relativní chyba výpočtu vzdálenosti programem. Jednotlivé výsledky měření jsou zaznamenány v *Tabulkách 3 a 4*.

Tab. 3: Opakované měření bodu ve vzdálenosti 10 cm, 15 cm a 20 cm od kamery

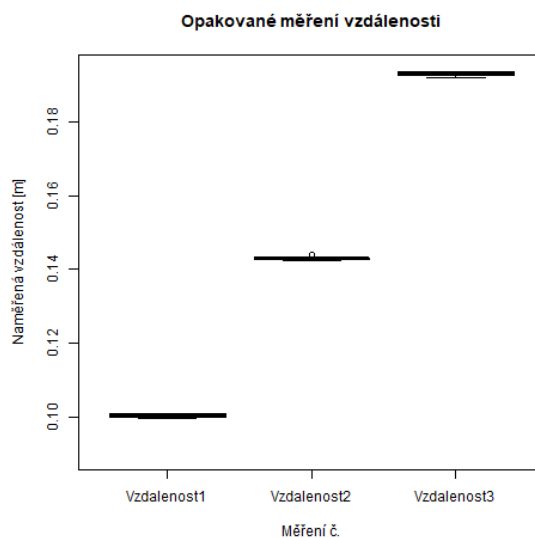
Měření č.	Vzdálenost [m]		
	0,1000	0,1500	0,2000
1	0,1006	0,1432	0,1934
2	0,0997	0,1423	0,1934
3	0,1006	0,1432	0,1934
4	0,1006	0,1441	0,1926
5	0,1002	0,1432	0,1926
6	0,1000	0,1423	0,1934
7	0,1002	0,1432	0,1918
8	0,1009	0,1432	0,1918
9	0,1009	0,1427	0,1926
10	0,1011	0,1427	0,1934

Pro vykreslení krabicových grafů z dat, které jsme získali opakovaným měření, je nutné stanovit následující statistické parametry: maximum, minimum, medián, horní a dolní kvartil, šikmost, špičatost. Krabicová část je tvořena hodnotami horního a dolní kvartilu, středová část reprezentuje medián. Linie vycházející z krabicové části grafu se nazývají vousy a reprezentují maximální, resp. minimální hodnotu v souboru.

Tab. 4: Výběrové statistické charakteristiky

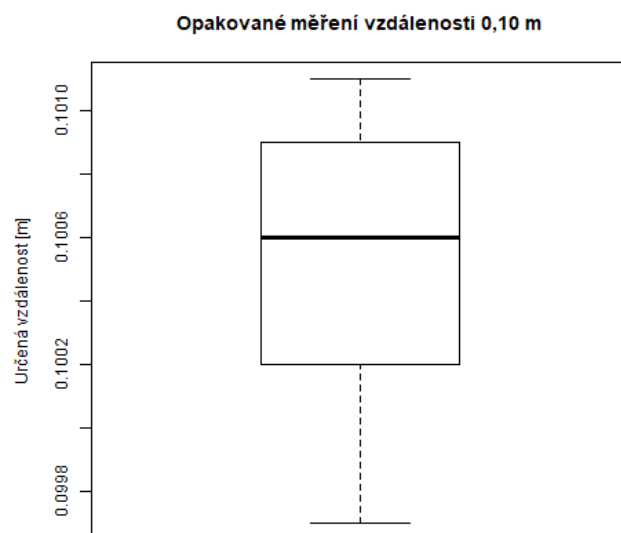
Statistický parametr	Měřené vzdálenosti [m]			
	0,100	0,150	0,150 ⁵	0,200
Max	0,1011	0,1441	0,1432	0,1934
Min	0,0997	0,1423	0,1423	0,1918
Medián	0,1006	0,1432	0,1432	0,1930
Dolní kvartil	0,1002	0,1427	0,1427	0,1926
Horní kvartil	0,1008	0,1432	0,1432	0,1934
Směr.odchylka	0,0004	0,0005	0,0003	0,0007
Šikmost	-0,3761	0,5045	-0,7070	-0,6870
Špičatost	-1,3407	-0,6131	-1,6780	-1,4900
Průměr	0,1005	0,1430	0,1429	0,1928

Statistické charakteristiky byly vypočítány softwarem RKWard, stejně tak byl tento program použit pro vykreslení jednotlivých krabicových grafů. Z jednotlivých výsledků lze pozorovat, že se směrodatná odchylka se zvětšující se měřenou vzdáleností zvětší. Vzhledem k tomu, že se směrodatná odchylka ve všech třech případech pohybuje v řádech desetitisícin, lze tvrdit, že hodnoty v souboru jsou si velmi podobné. Šikmostí vyjadřujeme asymetričnost rozložení kolem jejich průměru. Hodnoty šikmosti prvního a třetího měření ukazují na převahu hodnot, které jsou větší, než je průměr a naopak tomu je u měření vzdálenosti č. 2. Hodnoty špičatosti menší než 0 vykazují o plochem rozdělení proměnných.

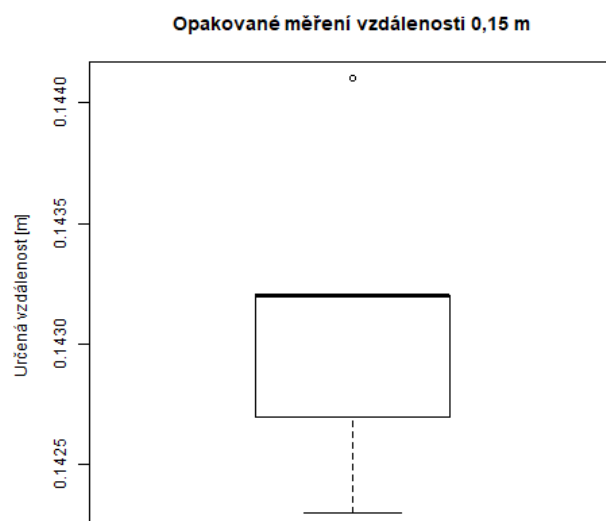


Graf č. 1: Opakované měření vzdáleností 10 cm, 15 cm a 20 cm

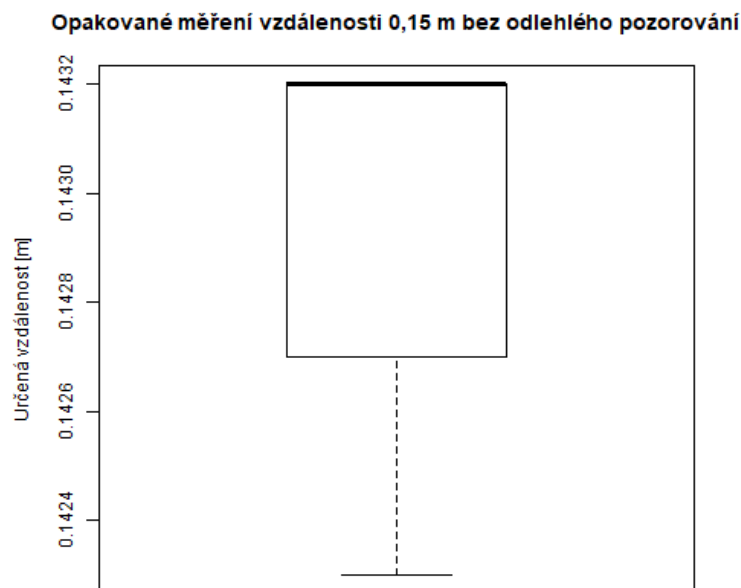
⁵ Výsledky výběrových charakteristik po odstranění odlehlého pozorování.



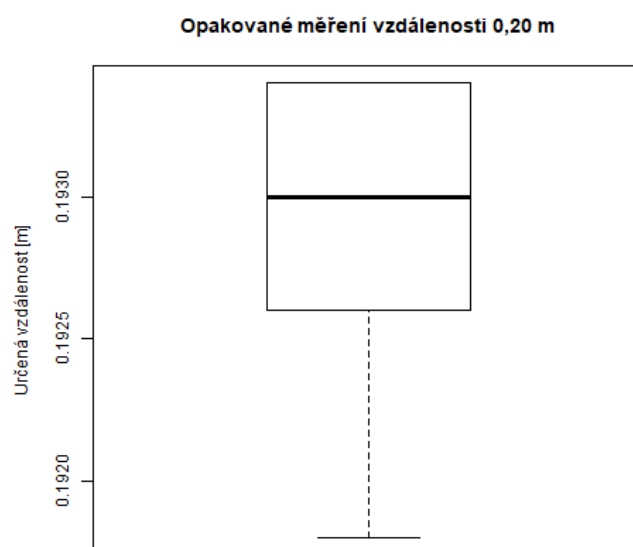
Graf č. 2: Opakované měření vzdálenosti 10 cm



Graf č. 3: Opakované měření vzdálenosti 15 cm včetně odlehlého pozorování



Graf č. 4: Opakované měření vzdálenosti 15 cm bez odlehlého pozorování



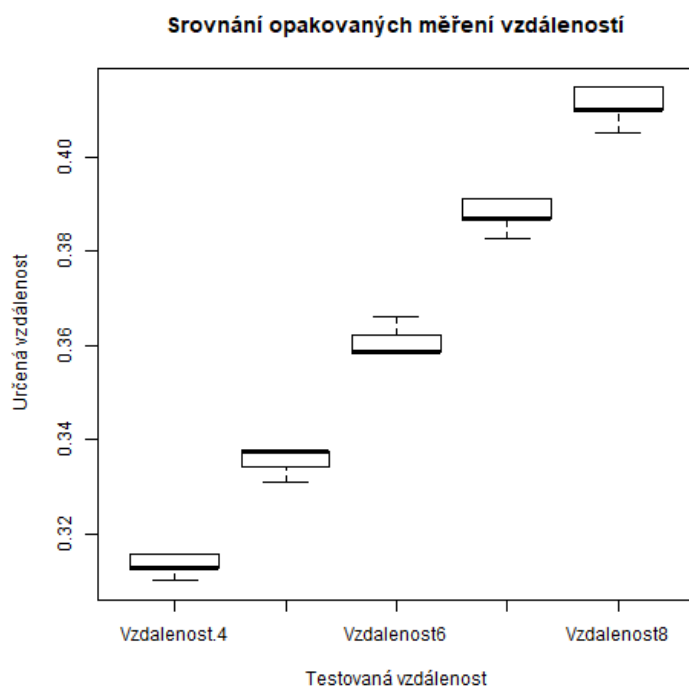
Graf č. 5: Opakované měření vzdálenosti 20 cm

Můžeme se všimnout, že se při zobrazení krabicového grafu příslušícího k měření vzdálenosti 15 cm, se objevilo tzv. odlehlé pozorování. Jedná se o hodnotu, která se mimořádně odlišuje od ostatních hodnot v souboru. Před dalším statistickým zpracováním je nutné tuto hodnotu odstranit, aby nezkreslovala výsledky statistických výpočtů. Po odstranění odlehlého pozorování (0,1441 m) byl zobrazen nový graf.

Opakovaný test určení vzdálenosti byl dále prováděn na vzdálenostech, které se s krokem 2,5 cm zvětšovaly. Výsledky opakovaného testu jsou zaznamenány v *Tabulce 5*.

Tab. 5: Opakované měření bodu ve vzdálenosti 31 cm, 33,5 cm, 36 cm, 38,5 cm a 41 cm od kamery

Měření č.	Vzdálenost [m]				
	0,3100	0,3350	0,3600	0,3850	0,4100
1	0,3101	0,3375	0,3586	0,3912	0,4147
2	0,3158	0,3375	0,3586	0,3912	0,4147
3	0,3129	0,3342	0,3623	0,3912	0,4147
4	0,3129	0,3375	0,3586	0,3825	0,4147
5	0,3158	0,3342	0,3623	0,3868	0,4098
6	0,3101	0,3375	0,3586	0,3868	0,405
7	0,3129	0,3342	0,3586	0,3868	0,4098
8	0,3129	0,3375	0,3662	0,3868	0,4098
9	0,3158	0,331	0,3586	0,3868	0,405
10	0,3129	0,3375	0,3623	0,3868	0,4098



Graf č. 6: Srovnání opakovaných měření ve vzdálenostech 31 cm, 33,5 cm, 36 cm, 38,5 cm a 41 cm

Tab. 6: Výběrové statistické charakteristiky pro měřené vzdálenosti

Statistický parametr	Měřené vzdálenosti [m]				
	0,3100	0,3350	0,3600	0,3850	0,4100
Max	0,3158	0,3375	0,3662	0,3912	0,4147
Min	0,3101	0,3310	0,3586	0,3825	0,4050
Medián	0,3129	0,3375	0,3586	0,3868	0,4098
Dolní kvartil	0,3129	0,3342	0,3586	0,3868	0,4098

<i>Horní kvartil</i>	0,3151	0,3375	0,3623	0,3901	0,4147
<i>Směr.odchylka</i>	0,0021	0,0023	0,0027	0,0028	0,0038
<i>Šikmost</i>	-0,1216	-1,1499	1,2292	-0,0943	0,3876
<i>Špičatost</i>	-1,3650	-0,8082	-0,6464	-0,9638	-1,5185
<i>Průměr</i>	0,3132	0,3359	0,3605	0,3877	0,4108

Na základě těchto opakovaných měření byla zjišťována přesnost programu stanovením absolutní a relativní chyby u každého měření, veškeré vypočítané hodnoty byly zaznamenány do *Tabulky č. 7.*

Tab. 7: Chyby měření

Měřená vzdálenost [m]	Chyba měření	
	Průměrná absolutní chyba [m]	Průměrná relativní chyba [%]
<i>0,1000</i>	-0,0005	-0,4800
<i>0,1500</i>	0,0071	4,7407
<i>0,2000</i>	0,0072	3,5800
<i>0,3100</i>	-0,0032	-1,0355
<i>0,3350</i>	-0,0009	-0,3552
<i>0,3600</i>	-0,0005	-0,1306
<i>0,3850</i>	-0,0027	-0,6987
<i>0,4100</i>	-0,0008	-0,1951

Absolutní chyba byla vypočítána podle vzorce:

$$abs.chyba = skutečná hodnota - naměřená hodnota \quad (8.1)$$

$$abs.chyba = 0,1000 - 0,1006$$

$$abs.chyba = -0,0006 \text{ m}$$

Relativní chyba byla vypočítána ze vzorce:

$$rel.chyba = \frac{abs.chyba}{skutečná hodnota} \cdot 100 \quad (8.2)$$

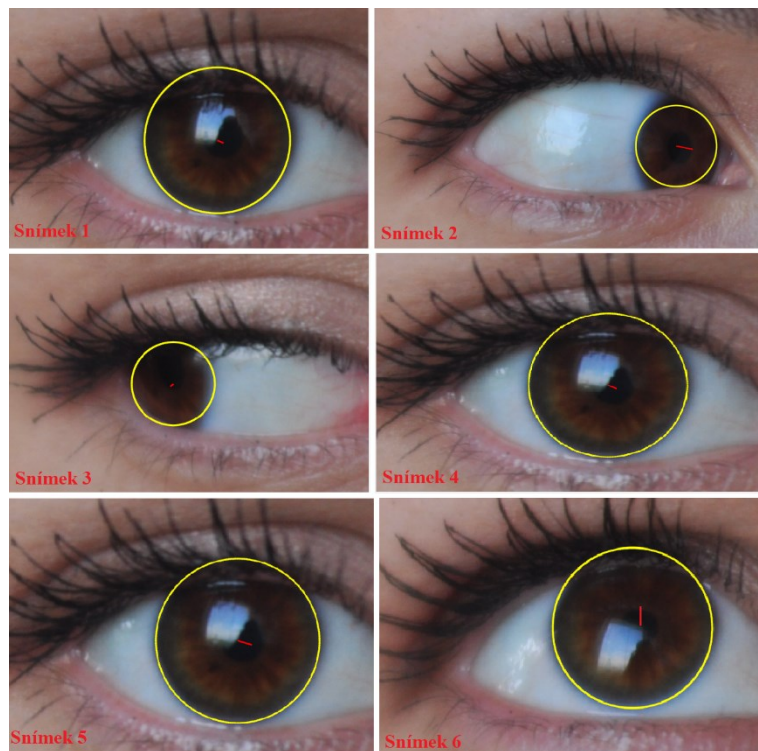
$$rel.chyba = \frac{-0,0006}{0,1000} \cdot 100$$

$$rel.chyba = 0,6 \%$$

Tímto byla spočítána celková průměrná absolutní chyba měření, která činí 0,0029 m a celková průměrná relativní chyba měření je 1,402 %.

8.2 Detekce natočení oka v oční jamce

Testování parametru natočení oka v oční jamce bylo provedeno na základě sady snímků získaných z kamer, které vstupovaly do příslušného algoritmu. Pro detekci bylo využita sada 10 snímků pravého oka, na které byly kamery zaměřeny (Obrázek 33). Pro stručnost byly uvedeny výstupy 10 měření, veškeré výsledky jsou zaznamenány v přehledné tabulce.



Obrázek 33: Výsledná detekce natočení oka v oční jamce

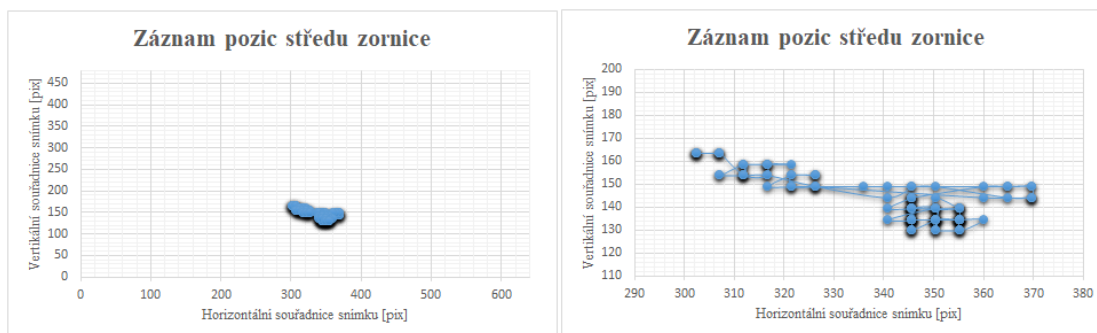
Pro stručnost byly zachyceno 6 detekovaných natočení oka, ze kterého je patrné, že i v případě pohledu oka zdánlivě přímo do kamery, je možné pozorovat mírné natočení oka. Získanými parametry testování je hodnota průměru zornice vyjádřena v mm, souřadnice středu zornice, který je definován souřadnicemi X a Y vyjádřenými v pixelech a Z-souřadnice v cm. Z-souřadnice představuje vzdálenost středu zornice k vnějšímu plášti kamery. Úhly natočení oční koule jsou vypočítány v horizontální a vertikální ose, jednotkou je radián.

Tab. 8: testování detekce natočení oka v oční jamce

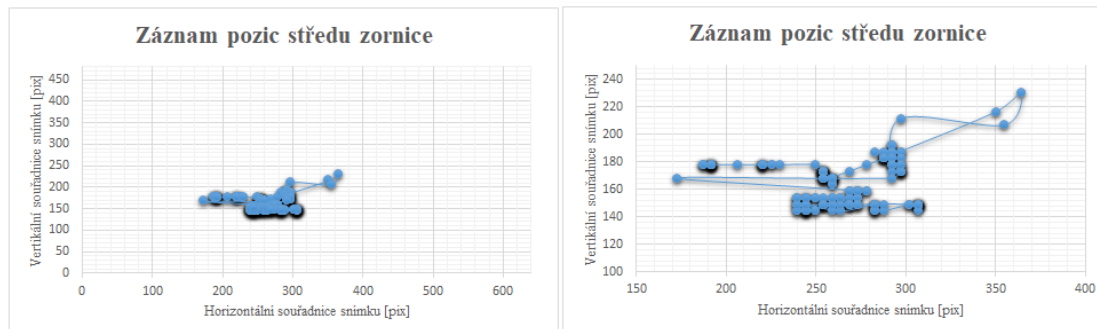
Testovaný snímek	Detekované parametry		
	Průměr zornice [mm]	Souřadnice středu zornice X, Y, Z [pix, pix, cm]	Úhly natočení [rad]
Oko č. 1	3,46	[519; 329; 14,1]	[0,1644; 0,0707]
Oko č. 2	2,78	[937; 475; 15,0]	[0,5673; 0,1126]
Oko č. 3	3,08	[415; 331; 13,5]	[-0,0860; 0,0628]
Oko č. 4	3,97	[440; 279; 13,6]	[0,1710; 0,0745]
Oko č. 5	3,96	[449; 261; 12,9]	[0,2887; 0,0788]
Oko č. 6	3,46	[574; 293; 14,0]	[0,3048; -0,0034]
Oko č. 7	3,83	[451; 268; 12,8]	[0,2574; 0,0794]
Oko č. 8	3,75	[436; 253; 12,7]	[0,2823; 0,0789]
Oko č. 9	4,23	[563; 287; 15,0]	[0,2650; 0,0859]
Oko č. 10	4,12	[435; 261; 12,7]	[0,2672; 0,0635]

8.3 Sledování pozice oka

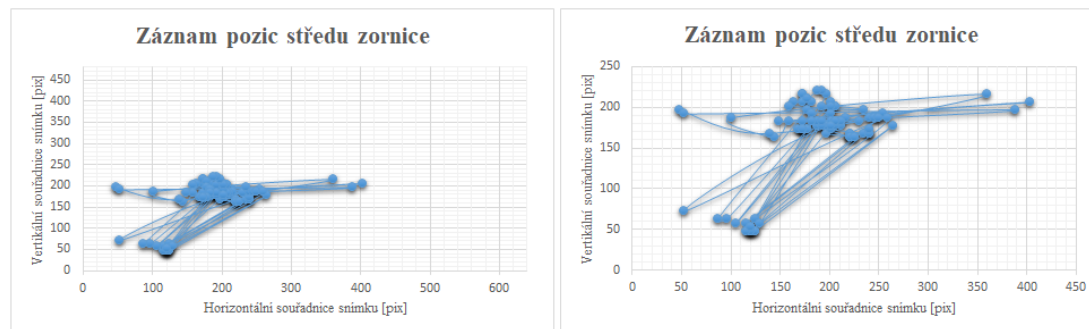
Pro sledování pozice oka byla využita detekce zornice a jejího středu ze zachyceného videa. Video bylo snímáno prostřednictvím kamer ve formátech 640x480 a 1280x720 pixelů. Délka videí se pohybovala od 3-7 sekund. V grafech jsou vykresleny jednotlivé pozice středu zornice oka za každý snímek videa. Z grafů je patrné, že se některé pozice středu zornice opakují, a proto jsou tak zaznamenány jedním bodem. Grafy nalevo jsou vykresleny v původních jednotkách os představující formát snímku, vpravo je možné vidět graf vykreslený ze stejných hodnot, avšak po úpravě jednotek os. Bez tohoto zásahu by nebyly pozice středu zornice zřetelné, a proto je nutné provést tyto úpravy.



Graf č. 7: Záznam jednotlivých pozic středu zornice pravého oka. Parametry videa č. 1: 640x480 pix, 00:00:04 s, 141 snímků

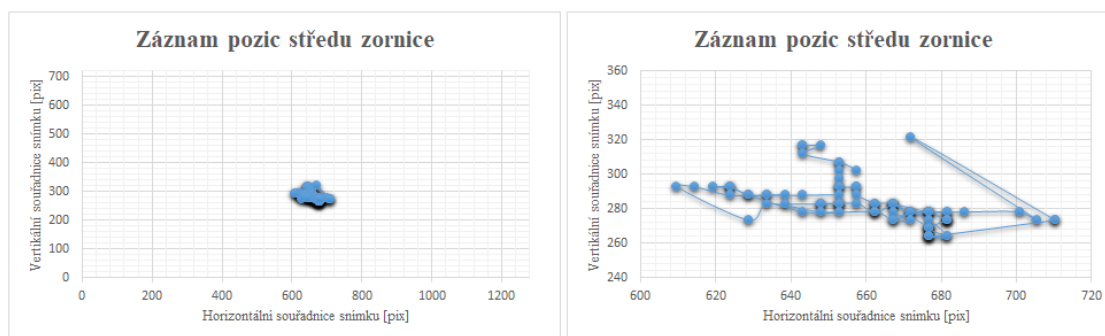


Graf č. 8: Záznam jednotlivých pozic středu zornice pravého oka. Parametry videa č. 2: 640x480 pix, 00:00:07 s, 215 snímků

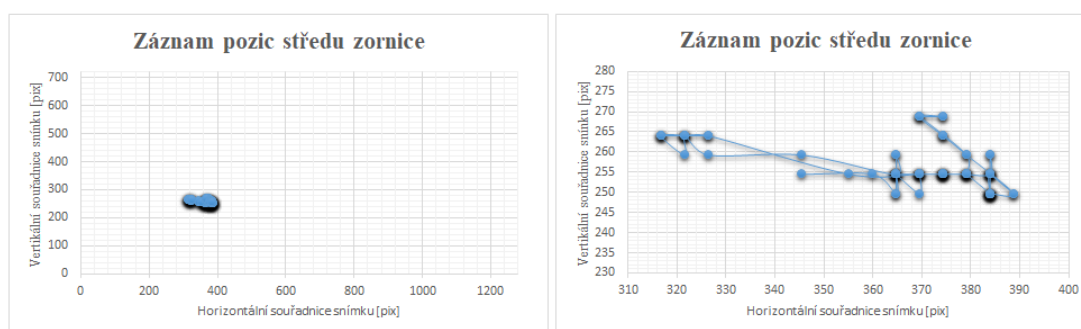


Graf č. 9: Záznam jednotlivých pozic středu zornice pravého oka. Parametry videa č. 3: 640x480 pix, 00:00:03 s, 105 snímků

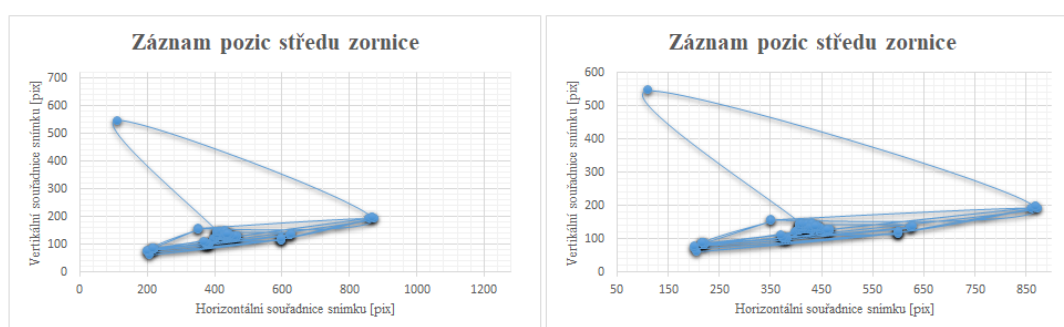
Grafy č. 7 a 8 představují jednotlivé pozice středu zornice ve snímané scéně. Z obou vyobrazení je možné vyčíst, že tyto pozice jsou rozmístěny na malé ploše snímku, a je tedy možné z grafu vyvodit, že pohyb oka respektive pozice středu zornice se nijak výrazně nemění. Naopak graf č. 9 ukazuje, jakým způsobem jsou zaznamenány pozice středu zornice v případě, že při snímání videa dochází k výraznému mrkání a pohybu hlavy v předozadním směru.



Graf č. 10: Záznam jednotlivých pozic středu zornice pravého oka. Parametry videa č. 4: 1280x720 pix, 00:00:03 s, 93 snímků



Graf č. 11: Záznam jednotlivých pozic středu zornice pravého oka. Parametry videa č. 5: 1280x720 pix, 00:00:03 s, 97 snímků



Graf č. 12: Záznam jednotlivých pozic středu zornice pravého oka. Parametry videa č. 6: 1280x720 pix, 00:00:04 s, 124 snímků

Grafy č. 10 a 11 představují záznamy pozic středů zornic bez rušivých elementů u snímků s rozlišením 1280x720 pixelů. Graf č. 12 představuje záznam pozic středu zornice v případě, že dochází k výraznějšímu pohybu oka nebo celé hlavy.

Během detekce ji mimojiné měřen čas detekování středu zornice a její kružnice při pohybu oka ve scéně, přičemž průměrné hodnoty rychlosti detekce jsou uvedeny v *Tabulce 9*.

Tab. 9: Měření průměrného času detekce středu zornice a její kružnice

Záznam	Průměrný čas detekce [s]	Čas detekce 1. snímku [s]	Čas detekce 2. snímku [s]	Rozlišení [pix]	Počet snímků [-]
Video č. 1	0,2331824	0,880404	0,321739	640x480	141
Video č. 2	0,2290126	0,927563	0,325312	640x480	215
Video č. 3	0,2381884	1,090270	0,343268	640x480	105
Video č. 4	0,2711312	0,959498	0,409686	1280x720	93
Video č. 5	0,2631184	0,917032	0,425083	1280x720	97
Video č. 6	0,3090302	1,093400	0,421407	1280x720	124

Je zjevné, že průměrný čas potřebný k detekování středu zornice a její kružnice ve snímku videa se pohybuje okolo 0,2335 sekund vzhledem k rozlišení 640x480 pix. V případě vyššího rozlišení, v našem případě 1280x720 pixelů, se čas zvyšuje na průměrných 0,2811 sekund. Je možné si také všimnout rozdílu časů potřebných pro detekci středu zornice v prvním a druhém snímku záznamu, kdy se tento čas pohybuje okolo 0,9780 sekund a snižuje se při následující detekci téměř o polovinu.

9. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navržení optoelektrického systému schopného měřit a vyhodnocovat vzájemnou polohu oka a mířidel. V teoretické části práce jsem rozebrala problematiku anatomie oka, sportovní střelby, biometrické identifikace a v závěru této části jsem popsala principy a metody měření polohy body ve 3D systému.

Stěžejním prvkem praktické části práce bylo měření polohy bodu ve trojrozměrném prostoru za využití páru kamer upevněných v konstrukci. Zjišťování polohy bodu ve trojrozměrném systému předcházelo kalibrování kamer. Kalibrací kamer byly zjištěny informace o vnitřních a vnějších parametrech kamer. Z vnitřních parametrů byly dále využity zobrazovací konstanta a kromě jiných i zkreslení, jež je dáno optickými vadami a parametry objektivu. Vnějšími parametry byla zjištěny informace o polohách a natočení kamer vůči sobě samým. Soubor těchto informací byl následně využit v algoritmu vypočítávající vzdálenost konkrétního bodu ve scéně zachycené oběmi kamerami. Navržený algoritmus pro výpočet třetí souřadnice, respektive z-ové souřadnice v souřadném systému, byl testován prostřednictvím opakovaných měření konkrétních vzdáleností. Tato měření byla statisticky vyhodnocena a na základě získaných výsledků byly stanoveny chyby měření. Absolutní chyba měření činí 2,9 mm a relativní chyba měření dosahuje tak 1,4 %.

Samotná detekce očního okolí a jeho prvků byla prováděna zvlášť v samostatném algoritmu. Detekovaným a vyhodnocovaným bodem byl střed oční zornice, na základě kterého byla detekována hranice zornice a hranice duhovky. Nalezení středu zornice umožňuje vypočítat její průměr, jež je variabilním parametrem s ohledem na vnější zdroje osvětlení a natočení oční bulvy v jamce. Průměr zornice se pohyboval v rozsahu 2,5 – 3,5 mm, což obecně odpovídá nižším průměrům zornic. Výsledné průměry zornic byly s největší pravděpodobností ovlivněny využitím výraznějšího vnějšího osvětlení za účelem zisku kvalitních snímků.

Natočení oční bulvy v jamce je stanoveno na základě odchýlení středu zornice od středu snímání scény. Výstupem této detekce jsou úhly definované v horizontálním a vertikálním směru. Přesnost výpočtu natočení oka je tedy výrazným způsobem závislá na co nejpřesnějším zachycení očního okolí do středu snímání scény. V závěru práce jsou zaznamenány výstupy pozic středů zornic zachycených v rámci jednotlivých videí. Toto grafické vyobrazení odráží pohyb oka ve scéně ve formě zaznamenaných bodů s ohledem na formát scény. Experimentálně získaná data byla statisticky a graficky zpracována.

Práce je primárně směřována do oblasti sportovní střelby za účely zefektivnění výuky mládeže a dorostu. Na základě výstupů této práce je možné hodnotit pokrok výuky případně naopak definovat chyby střelce. Výstupy přinášejí zpětnou vazbu trenérům, kteří tak jsou schopni lépe a účelně pracovat s žáky. Výstupy této diplomové práce jsou jak ve formě číselných dat (určení souřadnic ve 3D systému, natočení oční koule v oční jamce), tak i ve formě grafických vyobrazení. Přínos této práce také vidím v oblasti zajištění bezpečnosti manipulace se střelnou zbraní. V kombinaci s plně automatizovaným detektorem implementovaným v rámci mířidel zamezujícího náhodnému výstřelu, pakliže by se oko nenacházelo v určitém snímání prostoru.

Reference

1. Synek, Svatopluk a Skorkovská, Šárka. Fyziologie oka a vidění. Praha : Grada Publishing, 2014.
2. Fiala, Pavel, Valenta, Jiří a Eberlová, Lada. Stručná anatomie člověka. Praha : Nakladatelství Carolinum, 2015.
3. Kuchynka, Pavel. Oční lékařství. Praha : Grada Publishing a.s., 2016.
4. Rozsival, Pavel et al. Oční lékařství. Praha : Galén, 2006.
5. Lang, Gerhard Klaus. Ophthalmology: A Pocket Textbook Atlas. New York : Thieme, 2007.
6. Táborský, František. Cílové sporty: Základní pravidla - organizace - historie. Praha : Grada Publishing a.s., 2007. str. 144.
7. Skanaker, Rangar. Sportovní střelba z pistole. Praha : Naše vojsko, 2007. str. 193. Sv. 1.
8. Brych, Jan. ČESKÝ STŘELECKÝ SVAZ, z.s. - informační server. [Online] 31. 3 2001.
9. Černý , Pavel, Vinduška, Václav a Dušek , Ondřej. Manuál obranné střelby II. Praha : Grada Publishing a.s., 2013. str. 320.
10. Černý , Pavel a Goetz , Michal. Manuál obranné střelby. Praha : Grada Publishing a.s., 2004. str. 214.
11. Bolle, Ruud M., a další. GUIDE TO BIOMETRICS. New York : Springer, 2004.
12. Pak, Roman, Matyáš, Václav a Říha, Zdeněk . Biometrie a identita člověka ve forenzních a komerčních aplikacích. Praha : Grada Publishing a.s., 2008.
13. Woodward, John , Orlans, Nicholas M. a Higgins, Peter T. Biometrics. Osborne : McGraw Hill Professional, 2002.
14. Ross, Arun A., Nandakumar, Karthik a Jain, Anil K. . Handbook of Multibiometrics. New York : Springer, 2006.
15. Hornová, Jara. Oční propedeutika. Praha : Grada Publishing a.s., 2011.
16. Chirchi, Vanaja Roselin.E., Waghmare, L.M. a Chirchi, E.R. Iris Biometric Recognition for Person Identification in. International Journal of Computer Applications. June 2011, stránky 1-6.

17. Daugman, John. How Iris Recognition Works. IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS FOR VIDEO TECHNOLOGY. 14, 2004, 1, stránky 21-30.
18. Mallikarjuna, A. a Madhuri, S. Biometric Security Techniques For IRIS Recognition System. International Journal of Research in Computer and. August 2013, stránky 589-593.
19. Barkhoda, Wafa, a další. Retina identification based on the pattern of. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2011, 113, stránky 1-8.
20. Farzin, Hadi , Hamid , Abrishami-Moghaddam a Moin, Mohammad-Shahram . A Novel Retinal Identification System. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2008.
21. BARTON STUDIO s.r.o. Sítnice & Medixa.org. [Online] 27. 4 2012. <http://cs.medixa.org/nemoci/sitnice>.
22. Duchowski, Andrew T. . Eye Tracking Methodology. London : Springer, 2017.
23. Electrooculography (EOG). Research solutions - Mind Media. [Online] 2018. <https://www.mindmedia.com/en/solutions/research/eog/>.
24. Šikl , Radovan. Zrakové vnímání. Praha : Grada Publishing a.s., 2013.
25. Eye movements during reading of a text. Research gate. [Online] <https://www.researchgate.net>.
26. Richard, Gans E. Video-oculography: A new diagnostic technology for vestibular patients. The Hearing Journal. May 2001, Sv. 54, 5, stránky 40-42.
27. Kálová, Ilona. Optické metody měření 3D objektů. Elektrověda. [Online] 12. 4 2005. <http://www.elektrověda.cz/clanky/05023/index.html#kap2.1.1>.
28. Yoshizawa, Toru . Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications. Yokohama : CRC Press, 2015.
29. Parts of a Stereo Vision System - NI Vision 2015 Concepts Help - National Instruments. <http://zone.ni.com>. [Online] 25. 10 2004.
30. Jähne, Bernd , Haussecker, Horst a Geissler, Peter . Handbook of Computer Vision and Applications: Systems and applications. 3. London : Academic Press, 2000.
31. Jaeseok, Kim a Hyunchul , Shin. Algorithm & SoC Design for Automotive Vision Systems: For Smart Safe Driving System. London : Springer, 2014.
32. Bouguet, Jean-Yves. <http://www.vision.caltech.edu>. [Online] 14. 10 2015.
33. The MathWorks, Inc. Computer Vision System Toolbox™ User's Guide. 2018.
34. Beneš, Jiří, Jiráček, Daniel a Vítek, František. Základy lékařské fyziky. Praha : Nakladatelství Karolinum, 2015.

35. Rosina, Jozef, Kolářová, Hana a Stanek, Jiří. Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů. Praha : Grada Publishing a.s., 2006.
36. Beneš, Jiří, Kyplová, Jaroslava a Vítek, František. Základy fyziky pro lékařské a zdravotnické obory. Praha : Grada Publishing a.s., 2015.
37. Fuka, Josef a Havelka, Bedřich. Optika a atomová fyzika. Praha : Státní pedagogické nakladatelství, 1961.
38. Davis, Harold. Expozice a světlo v digitální fotografii. [překl.] Ladislav Hlavatý. Brno : Computer Press a.s., 2008.

Seznam příloh

Příloha A	66
A. 1. Základní zákony a principy optiky.....	66
A.2. Optická soustava a zobrazování	69
A. 3. Optický systém oka	73
A. 4. Rozlišovací schopnost oka	75
Příloha B (CD).....	76
B. 1. Vlastní dokument	76
B. 2. Algoritmus navrženého systému	76

Přílohy

Příloha A

A. 1. Základní zákony a principy optiky

Fyzikální optika se obecně zabývá vlastnostmi a zákonitostmi světelných jevů, které vznikají při šíření světla a při jeho interakcích s okolním prostředím. Optický systém lidského oka pracuje na principu elektromagnetického vlnění dopadající na fotoreceptory sítnice, přičemž viditelné spektrum elektromagnetického záření spadá do intervalu 360-780 nm. (34) Pro šíření světla je nutná existence optického prostředí, jehož významným parametrem je index lomu n , který je závislý na vlnové délce světla. Index lomu je zapisován s konkrétní vlnovou délkou, ke které je vztahen, pakliže není uvedena vůbec, jedná se obecně o vlnovou délku cca 589 nm, jež odpovídá žlutému světlu. Absolutní index lomu n popisuje kolikrát je rychlost světla ve vakuu vyšší než rychlost světla v jiném prostředí, naopak relativní index lomu představuje poměr rychlostí ve dvou odlišných prostředích. Absolutní index lomu lze vypočítat ze vzorce:

$$n = \frac{c}{v},$$

kde c vyjadřuje rychlost světla šířeného ve vakuu a v je rychlost světla ve sledovaném prostředí. Index lomu je závislý na vlnové délce λ , neboť i rychlost v vykazuje tuto závislost. Ve vakuu je index lomu roven hodnotě 1, ostatní prostředí mají index lomu vyšší, neboť rychlost světla v jiných prostředích je zpomalována. (4)

Světlo se nejrychleji šíří ve vakuu (téměř 300 milionů km/s) bez ohledu na vlnovou délku, naopak závislost rychlosti na vlnové délce v jiných materiálech charakterizují disperzní jevy. Disperzní jevy umožňují rozložit bílé světlo, které je polychromatické na spektrum barev jednotlivých vlnových délek. Rozklad bílého světla probíhá přes disperzní hranol a je umožněn v důsledku schopnosti barev resp. vlnových délek, šířit se rozdílnými rychlostmi v prostředí. Vlnová délka fialové barvy je nejkratší ($\lambda = 360 \text{ nm}$), proto se šíří prostředím nejpomaleji, naopak je tomu u červené barvy, neboť její vlnová délka je největší. ($\lambda = 780 \text{ nm}$) Získané barevné spektrum rozkladem bílého světla je monochromatický komplex barev, které dále již nelze rozložit. (35) Míra disperze je vyjádřena Abbéovým číslem v_d , která popisuje odlišnost indexu lomu modré a červené barvy oproti indexu lomu žluté barvy nacházející se uprostřed spektra. S nízkou hodnotou Abbéova čísla lze o materiálu říci, že se vyznačuje vysokou disperzí, a tedy je velký rozdíl indexu lomu mezi vlnovými délkami na okrajích spektra. S klesající hodnotou Abbéova čísla se kromě zvyšující se disperze bude rozšiřovat spektrum. (3)

Světlo, v našem případě viditelné spektrum světla, je definováno jako vlnění, které je charakterizováno svou konečnou fázovou rychlostí (fází), frekvencí, která je konstantní v případě statických rozhraní, přičemž v opačném případě nastává Dopplerův jev, amplitudou a polarizací. Jevy charakteristické pro vlnění jsou světelná polarizace, interference, difrakce, rozptyl, absorpce či odrazivost.

➤ Světelná polarizace

Paprsek světla emitovaný přírodními či umělými zdroji je nepolarizovaný, neboť kmitá v různých rovinách při zachování stejných optických vlastností. Kmity nepolarizovaného světla jsou nahodilé a lidské oko není schopné tyto roviny rozeznávat. Pakliže jsou kmity elektromagnetického pole orientovány do jedné roviny, nazýváme takové světlo polarizovaným. Polarizace světla může být způsobena lomem, dvojlomem nebo odrazem a probíhá částečně nebo zcela. Polarizace světla, respektive její míra, je hodnocena stupněm polarizace, kdy stupeň zcela polarizovaného světla je roven 1 a nepolarizovanému světlu je přiřazena hodnota 0. V oblasti oftalmologie je princip světelné polarizace využíván ve formě polarizovaných filtrů využívaných pro diagnostiku vad optického aparátu nebo jako součást brýlových čoček. Při dopadu nepolarizovaného světla na polarizační filtr dochází k průchodu skrz filtr pouze kmity shodné s kmity polarizovaného filtru. Výstupem polarizovaného filtru je lineárně polarizované světlo, jehož intenzita je poloviční oproti intenzitě původně dopadajícího světla. (35). (36)

➤ Světelná interference

Světelná interference neboli skládání světla je jev, kdy dochází k zesilování či zeslabování světelných vln v závislosti na rozdílu drah dvou koherentních paprsků světla. Koherence paprsků je definována vlněním o shodné frekvenci a fázovým rozdílem, který je časově konstantní. Jev interference světla lze pozorovat např. na mýdlové bublině, která po dopadu bílého světla je duhově zbarvena. Tato barevnost je zapříčiněna právě interferencí světla po odrazu od tenkých vrstev. Principu interference je využíváno pro konstrukci optických měřicích přístrojů v oftalmologii či optometrii nebo při výrobě antireflexních vrstev, vlivem kterých dochází k destruktivní interferenci světla a snížení odrazivosti plochy. (35)

➤ Ohyb světla

Ohyb světla lze vyjádřit termínem difrakce a je způsobena dopadem světla na bariéru, jejíž velikost je menší nebo srovnatelná s vlnovou délkou světla. Při dopadu světla na překážku dochází k ohybu světla, které se šíří i do oblastí geometrického stínu a ovlivňuje tak rozlišení optického systému. Při difrakčních jevech není světlo šířeno přímočaře, ale následkem dopadu na překážky se rozbíhá. (3)

➤ Rozptyl světla

Rozptyl světla je fyzikální vlastnost, která se uplatňuje v nehomogenních prostředích, kterým světlo prochází. Nehomogenní prostředí se vyznačuje rozdílnými indexy lomu v různých místech. Vlivem těchto nehomogenit dochází k vychýlení původního směru šíření paprsku a přerozdělení intenzit rozptýleného světla. Optický systém lidského oka je tvořen mnoha nehomogenními prostředí, a proto je nutné zohlednit tento fyzikální jev ve výsledném obrazu, neboť způsobuje nežádoucí osvětlení a tím snižuje kontrast obrazu. (3)

➤ Absorpce světla

Absorpce je obecně definována jako vstřebání nebo zeslabení účinku energie. Průchod světla prostředím způsobuje vstřebávání určitého množství energie, které pohlcují molekuly či atomy daného prostředí a důsledkem tohoto jevu je postupné zeslabování intenzity světelného svazku. Míra zeslabení intenzity světelného svazku je vyjádřena bezrozměrnou veličinou absorpce A . Tuto fyzikální závislost definuje Lambert-Beerův zákon, kde intenzita prošlého svazku I vůči intenzitě dopadajícího záření I_0 exponenciálně klesá se součinem koeficientu absorpce α a vzdálenosti d , kterou procházející světlo urazilo. Schopnost absorpce prostředím roste s tloušťkou prostředí. (36), (37)

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha d}$$

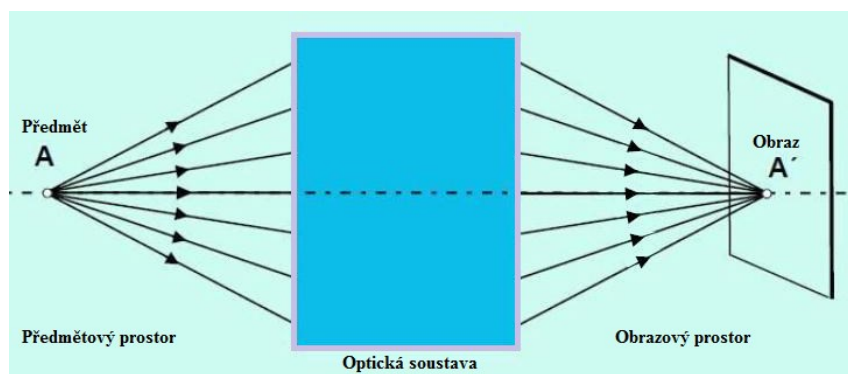
Ve fyzikální optice se dále uplatňuje několik zákonů, které definují odraz světla, lom světla, mezní úhel a absorpci. Odraz světla vzniká při dopadu světla na rozhraní dvou optických prostředí, kdy dochází k odrazu světla do původního prostředí. Lom světla zejména nastává, jestliže jedno z prostředí je neprůhledné, pokud je plocha dokonale hladká jedná se o zrcadlo.

Optický systém lidského oka zahrnují rozhraní vzduch-přední ploška rohovky, zadní ploška rohovky-nitrooční tekutina, komorová voda-přední ploška čočky, zadní plocha čočky-sklivec. Při průchodu světla těmito rozhraními je uplatněn zákon o lomivosti světla. V případě dopadu paprsku světla na rozhraní prostředí, která jsou rozdílná, dochází k rozdělení paprsku na dva nové, z nichž jeden je lomený a prochází prostředím dále a druhý je odražený a zůstává v původním prostředí. Zásadní význam má úhel dopadu ε světelného paprsku na optické prostředí. Úhel dopadu se nachází mezi dopadajícím paprskem a kolmicí sestrojenou v bodě dopadu. Úhly lomu se nacházejí mezi konkrétním paprskem a kolmicí sestrojen v bodě dopadu. Pokud je úhel lomeného paprsku menší než úhel dopadu, pak dochází k lomu ke kolmici (přechod paprsku do hustšího prostředí), v opačném případě se jedná o lom od kolmice. (přechod do řidšího prostředí) V případě úhlu rovnému 90° v optickém prostředí (mimo vzduch) dochází ke snížení rychlosti šíření světla z důvodu úplného odrazu. Pokud světelný paprsek dopadá pod jiným úhlem než je 90° , nastává lom paprsku. Úhel lomu je závislý na prostředí, ve kterém dochází k odrazu a platí, že čím vyšší je hustota optického prostředí, tím větší je úhel dopadu. (37)

Příloha A. 2. Optická soustava a zobrazování

Optická soustava je obecně definovaná jako systém, jehož složkami jsou čočky, hranoly, zrcadla, difrakční prvky aj., jejichž uspořádání je účelově zobrazovací, měřicí nebo osvětlovací. Účelem optické soustavy je modifikace vstupního světelného paprsku na výstupní paprsek o definovaných vlastnostech. Svazky paprsků charakterizujeme podle způsobu vzájemného protnutí. Jestliže se paprsky neprotínají v jednom bodě, jedná se o astigmatické paprsky. V případě protnutí paprsků v jediném bodě, je svazek paprsků stigmatický. Optickou soustavu lze nazvat ideální a to v případě, že splňuje určitá kritéria. Zásadní kritéria spočívají v principech konečného zobrazení. V ideální optické soustavě obrazový bod, přímka či rovina nacházející se v předmětovém prostoru odpovídá právě jednomu bodu, přímce či rovině obrazového prostoru. Ve skutečnosti se lze takovéto ideální optické soustavě pouze blížit, neboť nelze sestavit optickou soustavu splňující tato kritéria. Dále lze optické soustavy charakterizovat jako centrované a decentrované. Centrovanou optickou soustavu nazýváme v případě, že středy křivosti všech optických členů leží na optické ose. Necentrovaná optická soustava nemá žádnou optickou osu a optické členy jsou různorodě rozprostřeny, avšak s těmito typy optických soustav se příliš nesetkáváme.

Pro popis principů optického zobrazování je nutné definovat několik pojmů, jež jsou jeho nedílnou součástí. Obecně optická soustava slouží k zobrazování, jež se děje na základě transformace vstupujícího homocentrického svazku paprsků na vystupující homocentrický svazek paprsků, jehož optické vlastnosti jsou předem dané. Podstatou optického zobrazování je předmět představující množinu bodů, která je zdrojem záření a nachází se v předmětovém prostoru. Výsledkem procesu zobrazování předmětu je obraz, jež se nachází za optickou soustavou a tato oblast je nazývána jako obrazový prostor. Kromě definování základních pojmů je zásadní stanovit znaménkové pravidlo. Ve směru příchodu světelných paprsků, tedy zleva doprava, se jedná o směr kladný. Za kladné jsou považovány i úhly, jejichž směr je shodný se směrem hodinových ručiček. (3)



Obrázek A2.1: Zobrazení optickou soustavou. Upraveno podle <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1703>

Optický systém je schopen vytvořit dva druhy obrazů. Neskutečný obraz vzniká v případě, kdy jsou světelné paprsky divergentní a nedochází k jejich protnutí v jednom bodě za optickou soustavou. Skutečný obraz vzniká, jestliže jsou světelné paprsky konvergentní a protínají se v obrazovém bodě. Zobrazení skutečného obrazu lze pozorovat na *Obrázku A2.1.*

(4) Mimo skutečného a neskutečného obrazu rozlišujeme zobrazení stigmatické a zobrazení sdružených bodů. Stigmatické zobrazení nastává, pakliže je bodu v předmětovém prostředí přiřazen konkrétní bod obrazového prostředí. Zobrazení sdruženými body je specifické, neboť obrazový bod je přesným obrazem předmětového bodu. Optickou soustavu popisujeme několika parametry, které lze pozorovat na *Obrázku A2.2*.



*Obrázek A2.2: Základní parametry optické soustavy. Upraveno podle:
http://www.aldebaran.cz/studium/f2_2001/optika.html*

Předmětové ohnisko F lze nalézt na levé straně soustavy a je to bod, jehož obraz se nachází v nekonečnu obrazového prostoru. Projde-li světelný paprsek právě předmětovým ohniskem F, bude tento paprsek rovnoběžný s optickou osou. Obrazové ohnisko F' se naopak nachází v obrazovém prostoru a je definován jako obraz bodu F nacházejícího v předmětovém prostoru. Body F a F' nejsou body sdruženými, naopak body H a H' jimi jsou. Body H a H' jsou předmětové resp. obrazové hlavní body vymežující hlavní roviny. Předmětovým hlavním bodem prochází předmětová hlavní rovina ξ , jež je zároveň kolmá na optickou osu soustavy. Naopak obrazovým hlavním bodem prochází obrazová hlavní rovina ξ' . Mimo hlavních rovin se při popisu optických soustav uplatňují roviny předmětová η a obrazová η' . V rámci uceleného popisu optické soustavy je nutné definovat předmětovou ohniskovou vzdálenost f , jež vymezuje interval mezi bodem F a H. Analogicky je definována obrazová ohnisková vzdálenost f' , která charakterizuje vzdálenost mezi body F' a H'. Pro odvození Gaussovi zobrazovací rovnice je nutné definovat parametr a resp. a' , jež definuje vzdálenost předmětové roviny η od předmětové hlavní roviny ξ . Zobrazovací rovnicí lze vypočítat vzdálenost a' , tedy vzdálenost obrazu a jeho velikost y' . Pro výpočet vzdálenosti a' pomocí zobrazovací rovnice platí:

$$\frac{f}{a} + \frac{f}{a'} = 1$$

Pro výpočet velikosti obrazu se používá přenásobení velikostí předmětu y hodnotou příčného zvětšení, pro který se využívá vzorce:

$$m = \frac{-fa'}{fa}$$

Zároveň platí, že pokud jsou indexy lomu pro obě prostředí (před i za optickou soustavou) stejná, pak jsou jejich ohniskové vzdálenosti také stejná v závislosti na znaménkové konvenci. V případě příčného zvětšení většího než je 0, obraz je vzpřímený. Pakliže je příčné zvětšení menší než 0, obraz bude převrácený. Kromě vztahů uvedených výše je nutné definovat také úhlové

zvětšení γ , pomocí něhož jsme schopni určit úhly σ a σ' . Parametr σ popisuje úhel světelného paprsku vůči optické ose, kterým vstupuje do optické soustavy, oproti tomu úhel σ' označuje úhel, pod kterým danou soustavu opouští. Úhlové zvětšení γ definuje rovnice:

$$\gamma = \frac{\tan \sigma'}{\tan \sigma}, \text{ a zároveň platí rovnice: } \gamma = \frac{a}{a'} \quad (3)$$

Zásadním omezujícím prvkem optických soustav jsou jejich clony. Clonění probíhá příčně vzhledem k procházejícímu světelnému paprsku a v rámci optických soustav rozlišujeme clonu aperturní a clonu zorného pole. Clona aperturní je definována jako zábrana čočky omezující svazek paprsků, který vychází z osového bodu předmětu. V souvislosti s aperturní clonou je charakterizován aperturní svazek, což je svazek, který vychází z osového bodu předmětu a zároveň prochází okrajem aperturní clony. Aperturní svazek je tvořen aperturními paprsky, které s optickou osou svírají určitý aperturní úhel. Clona zorného pole je součástí čočky, která v největším rozsahu omezuje zorné pole optické soustavy. Zorné pole je obecně charakterizováno jako úsek předmětového prostoru, jež lze optickou soustavou zobrazit. V souvislosti s oběma clonami se zavádí pojem clonové číslo. Clonové číslo definuje poměr ohniskové vzdálenosti vůči průměru šterbiny, v našem případě vstupní pupily. Vstupní pupila soustavy představuje obraz aperturní clony směrem do předmětového prostoru, výstupní pupila je obrazem aperturní clony směřovaného do obrazového prostoru. Clonovým číslem jsme schopni do určité míry ovlivnit průchod světla a s tím spojenou hloubku ostrosti obrazu. Hloubka pole ostrosti představuje úsek předmětového prostoru, jehož obraz bude ostrý. Hloubka ostrosti d_F je taková vzdálenost dvou rovin obrazového prostoru, kdy obraz určitého bodu stále ostrý. (38) Clonové číslo c optické soustavy lze vypočítat podle vzorce:

$$c = \frac{1}{2NA'},$$

kde NA' je tzv. numerická apertura v obrazovém prostoru, jež je definována vzorcem:

$$NA' = n' \cdot \sin \sigma'_k = \frac{NA}{m}$$

Parametr n' charakterizuje index lomu obrazového prostoru, σ'_k je definován jako úhel obrazového aperturního paprsku a m je příčné zvětšení. Výpočet zaostření optické soustavy na nekonečno se provádí podle vzorce zahrnující ohniskovou vzdálenost f' , index lomu obrazového prostoru n' a průměr vstupní pupily D ,

$$c = \frac{f'}{n' \cdot D} \quad (3)$$

Optické zobrazování je závislé na odrazu a lomu světelných paprsků na vhodném rozhraní. Vhodná rozhraní tvoří např. sférické čočky, které jsou tvořeny jednou nebo dvěma kulovými plochami. Prostředí mezi kulovými plochami disponuje indexem lomu odlišným oproti

okolnímu prostředí. Při dopadání světelných paprsků na sférickou plochu dochází k jejich lomu, jež každý bude rozdílného úhlu. Lomené světelné paprsky se střetávají ve stejném místě, které je pojmenované jako ohnisko. Sférické plochy ohraničující optickou soustavu definují objekt zvaný čočka. Čočku definuje její optická mohutnost D , kterou lze získat převrácením hodnoty obrazové ohniskové vzdálenosti. Čočky rozlišujeme podle hodnoty jejich mohutnosti na rozptylné a spojný. Rozptylná čočka, obecně nazývána jako rozptylka, má hodnotu optické mohutnosti zápornou, naopak spojná čočka, též zvaná spojka, má hodnotu optické mohutnosti kladnou. U spojných čoček rozlišujeme několik druhů v závislosti na typech ploch. Spojné čočky mohou být bikonvexní, kdy obě plochy mají kladnou optickou mohutnost, plankonvexní, kde jedna ploška je rovinná a druhá je kulová s kladnou mohutností. Posledním typem spojný čočky je konkávkonvexní, též nazývaná jako dutovypuklá, jejíž optické mohutnosti jsou záporné. Rozptylné čočky lze dělit na bikonkávní, plankonkávní a konvexkonkávní. U bikonkávních čoček jsou optické mohutnosti ploch záporné, plankonkávní čočka má jednu plochu rovinnou a druhá plocha má optickou mohutnost zápornou. Vypukloduté čočky, tedy konvexkonkávní, jsou charakteristické kladnými optickými mohutnostmi, přestože konečný výsledek je záporný. Při zobrazování předmětu nacházejícího se větší než dvojnásobné vzdálenosti od předmětového ohniska pomocí spojných čoček, je výsledný obraz skutečný, převrácený a zmenšený. Pokud je zobrazován předmět ve dvojnásobné vzdálenosti od předmětového ohniska, obraz bude skutečný, převrácený a stejné velikosti jako je původní předmět. Obraz skutečný, převrácený a zvětšený vznikne, jestliže se zobrazovaný předmět nachází mezi předmětovým ohniskem a dvojnásobnou ohniskovou vzdáleností. V případě, že se zobrazovaný předmět nachází přímo v předmětovém ohnisku, pak je výsledný obraz vytvořen v nekonečnu. Předmět se může nacházet také mezi čočkou a předmětovým ohniskem a jeho výsledným zobrazením získáme obraz zdánlivý, vzpřímený a zároveň zvětšený. Obraz zdánlivý, vzpřímený a stejné velikosti vzniká, pakliže se předmět nachází v hlavní obrazové rovině. Výše popsaných principů se využívá v problematice fotografování, promítání, zobrazování pomocí lupy, dalekohledu či mikroskopu. Zobrazováním rozptylnou čočkou vzniká obraz mezi obrazovým ohniskem a čočkou a to bez ohledu, kde v předmětovém prostoru se předmět nachází. Výsledný obraz je zdánlivý, vzpřímený a zmenšený. Pro získání skutečného obrazu je při zobrazování nutné rozptylné čočky kombinovat s čočkami spojnými. Kromě sférických čoček lze rozlišovat čočky plancylindrické, sférocyldrické, torické a jiné, ale popis všech principů a zákonitostí svým rozsahem převyšuje obsah diplomové práce.

(4)

Příloha A. 3. Optický systém oka

Optická soustava lidského oka je tvořena rohovkou, komorovou vodou, oční čočkou a bělimou, přičemž nejpodstatnějšími částmi jsou rohovka a čočka. Optická soustava lidského oka je schopna propustit rozsah vlnových délek cca 400-1400 nm, přičemž záření vlnových délek vyšších než 1400 nm je filtrováno zejména komorovou vodou. Největší absorpci záření zajišťuje oční čočka a následuje rohovka. Během průchodu světelného svazku jednotlivými prostředími dochází vlivem ztrát světelného toku k jeho utlumování. Propouštění světelných paprsků je zajištěno oční čočkou, které se v rámci postupného stárnutí snižuje. Největší účinnost světelného svazku dopadajícího na sítnici je daná Stiles-Crawfordovým jevem 1. druhu, který omezuje vliv okrajových paprsků a rozptýleného světla. Kromě tohoto jevu je výsledné zobrazení ovlivněno celkovým osvětlením sítnice, jež je definováno v trolandech Td.⁶ Se zákonitostmi osvětlování sítnice úzce souvisí schopnost oka fungovat za fyziologických podmínek v rozsahu jasu 10^4 cd/m^2 , (dynamický rozsah je však $10^6 \text{ cd/m}^2 - 10^{-6} \text{ cd/m}^2$ – *absolutnípráhcitlivosti*) V případě, kdy dochází ke změnám světelných podmínek, je optický systém nucen provést adaptaci na světlo popřípadě tmu. Adaptace oka na světlo je rychlejší a trvá cca 1 minutu, oproti adaptaci na tmu, která trvá zhruba 1 hodinu. Při intenzivním ozáření sítnice dochází v důsledku oslnění ke snížení citlivosti.

Proces zobrazování je závislý na principu akomodace, díky níž dochází vlivem změny tvaru čočky, polohy a rozložení indexu lomu čočky k zaostřování oka. Se schopností akomodace souvisí problematika blízkého a vzdáleného bodu oka. Blízký bod oka je definován jak nejbližší bod nacházející se na pomyslné optické ose, na který je oko schopné zaostřit při plné akomodaci. Blízký bod není pevně danou hodnotou, neboť se s věkem mění. Oční čočka vlivem stárnutí ztrácí svou elasticitu, a tím i schopnost se vyklenout, a proto se s vyšším věkem blízký bod na optické ose vzdaluje. V dětství je blízký bod umístěn ve vzdálenosti cca 7 cm před okem, avšak kolem 40. roku je tento bod ve vzdálenosti až 40 cm. Pakliže dojde k posunu blízkého bodu za tzv. konvenční zrakovou vzdálenost, která činí 25 cm před okem, je nutné tuto oční dysfunkci kompenzovat. Kromě blízkého bodu je definován i daleký bod, který je definován jako nejvzdáleněji položený bod na optické ose, na nějž je oko schopné zaostřit bez jeho akomodace. Daleký bod se u zdravého jedince nachází ve vzdálenosti 5 m před okem. (36) Schopnost oka dosáhnout co nejlepší zobrazení zajišťuje vrstvička slzného filmu. Slzný film vytváří na povrchu rohovky optimální optické prostředí, jehož vlastnosti mají zanedbatelný vliv na optickou mohutnost rohovky. (3) Celková mohutnost (maximální akomodace) lidského oka je 60 D, přičemž největší mohutnosti dosahuje rohovka, a to 40-45 D a následuje čočka s 20 D. (36)

Důležitou optickou součástí oka tvoří duhovka, jejíž hlavním úkolem je vytvářet aperturní clonu, omezující vstupující světelný paprsek. Regulace světelného paprsku je podmíněna změnou průměru pupily a množství světla procházející zornicí je tak přímo úměrné druhé mocnině jejího průměru. Lidské oko vzhledem k umístění vstupní a výstupní pupily představuje decentrovanou optickou soustavu, neboť vlivem akomodace jsou obě pupily vychylovány dopředu či dozadu. Nejvyšší míru ostrosti lidské oko vykazuje v případě, že průměr pupily je v rozsahu 2-3 mm. Při větším průměru zornice je výsledné zobrazení zatíženo celkovými vadami oka, nižší průměr

⁶ Jednotka 1 Td je definována jako výsledná hodnota osvětlení pupily o plošném průměru 1 mm², které je zapříčiněno jasnem pozorovaného předmětu 1 cd/m².

zornice naopak negativně ovlivňuje kvalitu výsledného zobrazení. Detektorem optického systému oka je z anatomického hlediska sítnice, jejíž fyziologické zakřivení umožňuje adekvátně zajistit zrakovou ostrost v periferiích.

Nezbytnou součástí optického systému oka jsou referenční osy a jejich úhly. Optická osa oka pomyslně prochází středy křivostí všech optických ploch v oku a průsečík, který vytváří se sítnicí, se nazývá zadní pól oka. Nejdůležitější referenční osou je zraková osa, která je vedena fixačním bodem k zornici. Dalšími osami jsou uzlová osa, jež prochází uzlovými body N a N', pupilární osa procházející středem pupily a osa fixace. Osa fixace protíná fixační bod předmětu a střed rotace oka a na základě této skutečnosti definuje pohyb oka. Maximální úhel rotace oka vůči ose fixace je 25-35°. (3)

Příloha A. 4. Rozlišovací schopnost oka

Rozlišovací schopnost je definována jako údaj o nejmenších možných rozměrech předmětů, které je možné vnímat a celkově vypovídá o kvalitě optické soustavy, ať už oka nebo přístroje. Zásadní veličinou optické soustavy je minimální rozlišovací úhel MAR Ψ , jež popisuje nejmenší lineární resp. úhlovou vzdálenost dvou bodů, které jsou zachyceny odděleně, a její převrácená hodnota definuje zřetelnost VA, kterou lze také nazývat jako vizus. Zřetelnost vizus je zásadně ovlivněn velikostí pupily, akomodačními ději, jasnem a kontrastem a v souvislosti s nimi prahem rozlišitelnosti kontrastu aj. Ostřetost přímo úměrně souvisí s množstvím osvětlení, tedy jasem. Rozlišovací mez oka, jinými slovy dvoubodové rozlišení, minimum separabile, je 60" a závisí na pozorovacích podmínkách zejména pak na osvětlení či kontrastu aj. (37) Pro schopnost oka rozlišit dva různé předměty je zásadní, aby mezi obrazy promítnutými na sítnici byl alespoň jeden čípek. V případě, že se mezi obrazy nenachází ani jeden čípek, oko není schopno rozlišit tyto dva samostatné předměty a ty v konečném výsledku splývají v jeden. (4) Zřetelnost systém je charakterizován dalšími prahy, které jsou definovány jako práh pro vnímání slabých světelných paprsků (*minimum perceptibile*), práh pro rozlišitelnost na základě kontrastu předmětu a pozadí (*minimum visibile*) nebo práh pro vnímání tvarů (*minimum legibile*). Kromě rozlišovacích schopností lze hodnotit i zřetelnost schopnosti, mezi něž řadíme vnímání světla, diferenciaci předmětů a pozadí, vnímání tvarů, barev, detailů, poloh předmětů apod. (3)

Příloha B (CD)

Příloha B. 1. Vlastní dokument

Příloha B. 2. Algoritmus navrženého systému